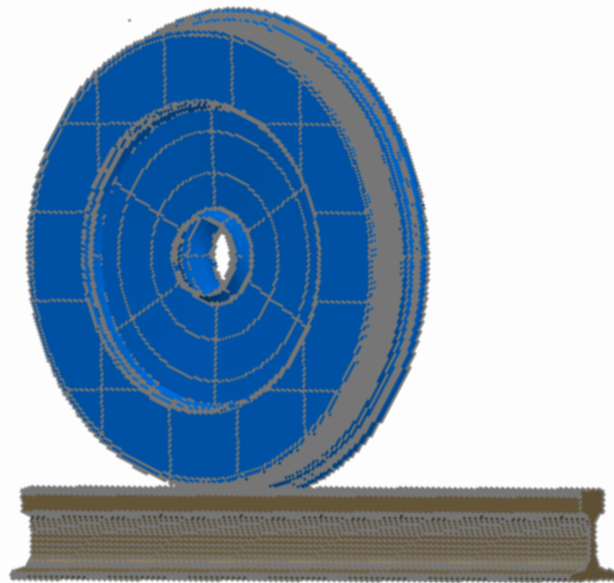




# ESTUDIO DE LA LONGITUD CRITICA DE FISURA EN RUEDA FERROVIARIA



**AUTOR: RAFAEL MADRID GRANDE**  
**TUTOR: JULIO ALVAREZ RODRIGUEZ**

# INDICE

<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCION.....	2
1.2 MOTIVACION .....	3
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3 FRACTURA .....</b>	<b>6</b>
3.1 INTRODUCCION.....	7
3.2 DEFECTOS Y CONCENTRACION DE TENSIONES .....	7
3.3 MECANISMO DE FRACTURA .....	10
3.3.1 CLIVAJE Y COALESCENCIA .....	10
3.3.2 MODOS DE FRACTURA .....	11
3.3.3 TENSIONES EN LA PUNTA DE LA FRACTURA.....	14
3.3.4 ZONA DE PLASTIFICACION.....	17
3.4 PARAMETROS DE FRACTURA MODO I.....	19
3.4.2 TENACIDAD A FRACTURA $K_{IC}$ .....	20
3.4.3 $K_Q$ RIGIDEZ A FRACTURA .....	24
3.4.2 $K_{EE}$ RIGIDEZ DE LA ENERGIA EQUIVALENTE.....	30
3.4.4 PARAMETRO J.....	36
3.5 MODO II.....	40
3.6 SOLUCIONES PARA MODO MIXTO I Y II .....	41
3.6.1 INTRODUCCION .....	41
3.6.2 SOLUCION DE WO .....	43
3.6.3 SOLUCION DEL GIRO .....	44
3.7 COMPRESION CON MODO II .....	46
3.7.1 COMPRESION PURA.....	46
3.7.2 SOLUCION DE YOFFE .....	48

<b>4. LA RUEDA FERROVIARIA.....</b>	<b>50</b>
4.1 INTRODUCCION.....	51
4.1.1 BOGIE .....	51
4.1.2 EJE MONTADO .....	52
4.2 LA RUEDA.....	54
4.2.1 PARTES DE LA RUEDA .....	54
4.2.2 TIPOS DE RUEDA.....	55
4.2.3 PARAMETROS A CONTROLAR .....	57
4.3 TIPOS DE ESFUERZOS QUE SOPORTAN LAS RUEDAS .....	60
4.4 DAÑO EN RUEDA .....	62
4.4.1 TIPOS DE DAÑO DE RUEDA .....	62
4.4.2 DEFECTOS EN LA ZONA DE LA PESTAÑA.....	63
4.4.3 DEFECTOS EN LA ZONA DE LA BANDA DE RODADURA .....	65
4.4.4 FISURAS TERMICAS .....	75
4.4.5. DEFECTOS EN EL VELO .....	76
4.4.6 DEFECTOS EN EL CUBO.....	77
4.5 MOVIMIENTO DE LAZO Y ESTABILIDAD EN DINAMICA.....	77
4.6 FABRICACION DE RUEDAS .....	80
4.6.1 INTRODUCCION .....	80
4.6.2 PROCESO DE FORJADO Y LAMINADO .....	80
4.6.2 TRATAMIENTO TERMICO.....	84
4.6.3 RELACION ENTRE FABRICACION Y RESISTENCIA A FRACTURA .....	86
 <b>5. LA VIA .....</b>	 <b>107</b>
5.1 INTRODUCCIÓN .....	108
5.2. PARTES.....	109
5.3 CALCULO DE LA VIA.....	110
5.3.1 ESFUERZOS .....	110
5.3 EL CARRIL .....	112
5.3.1. INTRODUCCION .....	112
5.3.2. FUNCIONES DEL CARRIL .....	112

5.3.3. PERFILES DEL CARRIL .....	113
5.4.4 DESGASTE DE LOS CARRILES .....	116
5.4.5 ACERO DE LOS CARRILES.....	117
5.5 TRAVIESAS .....	118
5.5.1 INTRODUCCION .....	118
5.5.2 FUNCIONES .....	118
5.5.3 TIPOS .....	119
<b>6 TEORIA DE CONTACTO RUEDA-CARRIL .....</b>	<b>121</b>
6.1 INTRODUCCION .....	122
6.2 MODELO BÁSICO DEL EJE MONTADO – CARRIL.....	123
6.3 CONTACTO NORMAL HERTZIANO .....	125
6.3.1 METODO DE CALCULO .....	125
6.3.2 RELACION DE A/B CON b/a.....	128
6.3.3 CALCULO SEMIEJES. ....	128
6.3.4 CONCAVIDAD, CONVEXIDAD Y SIGNO DE RADIO .....	130
6.3.4 PRESION DE CONTACTO.....	130
6.3.5. APLICACIÓN AL CAMPO DE FERROCARRIL.....	130
6.4 EL CONTACTO TANGENCIAL .....	134
6.4.1 FUERZAS Y MOMENTOS DEL EJE MONTADO .....	134
6.4.1.2 APROXIMACIONES .....	135
6.4.2 FUERZAS TANGENCIALES: MODELOS SIMPLES DE FRICCIÓN A RODADURA.....	137
6.4.3 EXPRESIONES LINEALES DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE.....	138
6.4.4 DEFINICIÓN DE PSEUDODESLIZAMIENTOS. ....	139
6.4.4 COEFICIENTES DE KALKER $C_{ij}$ .....	146
6.5 FUERZAS DE CONTACTO SUFRIDAS POR LA RUEDA.....	147
<b>7. CALCULOS.....</b>	<b>149</b>
7.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL ESTUDIO .....	150
7.1.1 CIVIA .....	150



7.1.2 RUEDA.....	153
7.1.3 EL CARRIL .....	153
7.2 CALCULOS DE TENSIONES .....	154
7.3 CALCULOS DE LONGITUD CRÍTICA PARA EL CASO DE FISURA EN VELO.....	161
7.3.1 INTRODUCCION .....	161
7.3.2 CRITERIO $K_{IC}$ .....	164
7.3.4 CRITERIO DE $K_{IIC}$ .....	165
7.3.4 CRITERIO DE $W_O$ .....	166
7.3.3 CRITERIO DE YOFFE.....	166
7.3.4 CRITERIO DEL GIRO DE LA GRIETA.....	167
7.3.5 CRITERIO DE LIBERACION DE LA ENERGIA, J.....	171
7.4 CALCULOS DE LONGITUD CRÍTICA PARA EL CASO DE FISURA EN BANDA DE RODADURA.....	171
7.4.1 INTRODUCCION .....	171
7.4.2 CRITERIO $K_{IC}$ .....	173
7.3.3 CRITERIO DE $K_{IIC}$ .....	173
7.3.4 CRITERIO DE $W_O$ .....	174
7.3.5 CRITERIO DE YOFFE.....	174
7.3.6 CRITERIO DEL GIRO DE LA GRIETA.....	175
7.3.7 CRITERIO DE LIBERACION DE LA ENERGIA, J.....	178
<b>8 CONCLUSIONES.....</b>	<b>179</b>
8.1 RESUMEN.....	180
8.1.1 TEMA 1: INTRODUCCION .....	180
8.1.2 TEMA 2: OBJETIVOS .....	180
8.1.3 TEMA 3: FRACTURA .....	180
8.1.4 TEMA 4: LA RUEDA FERROVIARIA .....	180
8.1.5 TEMA 5: LA VIA .....	181
8.1.6 TEMA 6: TEORIA CONTACTO.....	181
8.1.7 TEMA 7: CALCULOS.....	181
8.2 CONCLUSIONES.....	182
8.3 FUTUROS TEMAS ESTUDIOS .....	184

## 9. BIBLIOGRAFIA..... 186

## ANEXOS ..... 189

CARACTERISTICAS CIVIA ..... 190

DATOS VELOCIDAD CIVIA..... 191

CONJUNTO BOGIE..... 192

CONJUNTO EJE MONTADO ..... 193

PLANOS RUEDA CIVIA..... 194

PERFIL RUEDA CIVIA..... 195

PLANO CARRIL UIC ..... 196

DISEÑO TRAVIESAS ..... 197

DATOS NORMATIVA UNE 13262..... 198

TABLA FACTORES DE FORMA ..... 201

# LISTA FIGURAS

## CAPITULO 3

3.2.I	TENSIONES EN PUNTA FISURA.....	9
3.3.I	FRACTURA POR CLIVAJE.....	10
3.3.II	FRACTURA POR COALESCENCIA.....	11
3.3.III	MODOS FRACTURA.....	12
3.3.IV	MODOS FRACTURA EN VISTA ESQUEMATICA.....	12
3.3.V	TENSIONES EN PUNTA FRACTURA.....	14
3.3.VI	TENSIONES EN POLARES.....	15
3.3.VII	TENSIONES EN PUNTA FISURA.....	16
3.3.VIII	ZONA PLASTIFICACION PEQUEÑA. LEFM.....	17
3.3.IX	ZONA PLASTIFICACION GRANDE PYFM.....	18
3.3.X	ZONAS PLASTICAS.....	18
3.4.I	TENACIDAD A FRACTURA FRENTE A OTROS FACTORES.....	21
3.4.II	RIGIDEZ A FRACTURA FRENTE AL ESPESOR DE PROBETA.....	21
3.4.III	PROBETAS PARA ENSAYO EN MODO I.....	22
3.4.IV	TIPOS DE GRAFICA EN EXPERIMENTO DE DET $K_{IC}$ .....	23
3.4.V	PROBETA CT30.....	24
3.4.VI	CURVA CARGA DESPLAZAMIENTO ETEST $K_Q$ .....	25
3.4.VII	CURVAS DESPLAZAMIENTO.....	26
3.4.VIII	CURVAS $K_{MAX}$ Y MUESTRAS CT30 FRACTURADAS.....	27
3.4.IX	CURVAS REPRESENTATIVA $K_{EE}$ .....	31
3.4.X	REPRESENTACION CTOD.....	32
3.4.XI	CURVA CON DIFERENTES VALORES DE $K_{EE}$ Y $K_Q$ .....	33
3.4.XII	RIGIDEZ A FRACTURA FRENTE A LIMITE ELASTICO.....	34
3.4.XIII	RIGIDEZ A FRACTURA FRENTE A LIMITE ELASTICO CON EXIGENCIAS DE LA NORMATIVA.....	34
3.4.XIV	PRODUCTO LIMITE ELASTICO FRENTE A RIGIDEZ A FRACTURA.....	35
3.4.XV	INTEGRAL J FRENTE A INCREMENTO A FRACTURA.....	37
3.4.XVI	CARGAS Y DESCARGAS EN ENSAYO CON UNA PROBETA PARA CALCULO DE $J_C$ .....	38
3.4.XVII	DETERMINACION DE $J_{IC}$ CON UNA SOLA PROBETA.....	38
3.4.XVIII	DETERMINACION DE STRECH WIDE ZONE.....	39
3.4.XIX	DETERMINACION DE $J_C$ CON SWZ.....	39
3.4.XX	DETERMINACION DE $J_C$ CON MAS DE UNA PROBETA.....	40
3.6.I	MODO MIXTO EN DIVERSOS CASOS.....	42
3.6.II	DIVERSAS MICROFOTOGRAFIAS DE FISURAS EN MODO MIXTO Y ESQUEMA DE GIRO BRUSCO EN FISURA.....	42
3.6.III	GRAFICA DE METODO DE LA ELIPSE.....	44
3.6.IV	MODELO DE FISURAS HIJAS.....	45
3.7.I	ESQUEMA PROBETA COMPRESION.....	47
3.7.II	ESQUEMA TEORIA YOFFE.....	48

## CAPITULO 4

4.1.I	BOGIE.....	51
4.1.II	EJES MONTADOS.....	53
4.2.I	LA RUEDA.....	54
4.2.II	RUEDA MONOBLOQUE.....	55
4.2.III	RUEDA BIBLOQUE.....	56
4.2.IV	RUEDA ELASTICA.....	56
4.2.V	PARAMETROS A CONTROLAR.....	58
4.2.VI	OVALAMIENTO.....	59
4.2.VII	DISTANCIA ENTRE CARAS.....	59
4.4.I	FISURAS EN PESTAÑA.....	64
4.4.II	DESGASTE EN BANDA RODADURA.....	66
4.4.III	ZONA AFECTADA TERMICAMENTE Y DESARROLLADA DE GRIETAS.....	68
4.4.IV	RUEDA CON PLANO.....	69
4.4.V	RUEDA CON DEFECTO EN BANDA RODADURA.....	70
4.4.VI	FALLO PRODUCIDO POR SHATTERING.....	73
4.4.VII	ZONA LOCALIZACION DE FISURA CIRCUNFERENCIAL EN LA LLANTA.....	74
4.4.VIII	CRECIMIENTO DE UNA FISURA POR SHATTERING.....	75
4.4.IX	FISURA CORCUNFERENCIAL EN EL VELO.....	77
4.5.I	GRADOS DE LIBERTAD EJE MONTADO.....	79
4.5.II	MOVIMIENTO DE LAZO.....	80
4.6.I	PREFORMA EN BLANCO Y VISTA PROGRAMA INFORMATICO.....	81
4.6.II	COLOCACION HERRAMIENTAS PARA CONSEGUIR EL PERFIL REQUERIDO.....	82
4.6.III	OPERACIÓN DE CONFORMADO Y VISTA PROGRAMA INFORMATICO.....	83
4.6.IV	RUEDA DEFORMADA EN PRENSA Y VISTA PROGRAMA INFORMATICO.....	84
4.6.V	INDICACION DE LAS MEDIDAS EN MAQUINAS LASER.....	84
4.6.VI	CARGA DE LA RUEDA EN LINEAS DE TRANSPORTE.....	85
4.6.VII	GRAFICA PARA LA MEDICION DE LA INCLUSIONES NO METALICAS.....	95
4.6.VIII	DUREZA FRENTE A TASA ROZAMIENTO.....	98
4.6.IX	RIGIDEZ FRENTE A CIRCUNFERENCIAL EN RUEDA.....	99
4.6.X	DISTRIBUCION RIGIDEZ SEGÚN EL AÑO.....	100
4.6.XI	DISTINTOS VALORES DE $K_Q$ Y $K_{EE}$ SEGÚN POSICION RUEDA.....	102
4.6.XII	RUEDAS PRODUCIDAS DESDE 1986.....	104
4.6.XIII	CONTENIDO EN GASES EN RUEDAS.....	104
4.6.XIV	VALORES DE $K_Q$ Y $K_{EE}$ FRENTE A MICROLIMPIEZA.....	105
4.6.XV	LOCALIZACION DE LA PRODUCCION SEGÚN EL AÑO.....	107

## CAPITULO 5

5.2.I	ESQUEMA CONPOSICION DE LA VIA.....	110
-------	------------------------------------	-----

## CAPITULO 6

6.1.I	MODO EJE MONTADO.....	125
6.1.II	ZONA CONTACTO.....	125
6.3.I	RADIO TRANSVERSAL O CURVATURA.....	127
6.3.II	CURVATURA RUEDA.....	128
6.3.III	CONTACTO RADIO LONGITUDINAL RUEDA.....	133
6.3.IV	ZONASCONTACTO RUEDA.....	134
6.4.I	GEOMETRIA EJE MONTADO Y SUS FUERZAS.....	137
6.4.II	MODELO COLOUMB Y MODELO FRICCION POR RODADURA.....	137
6.4.III	ANTECEDENTES HISTORICOS.....	138
6.4.IV	PROYECCIONES VELOCIDADES.....	141
6.4.V	PSEUDODESLIZAMIENTOSPORA JOHNSON.....	143
6.4.VI	FORMAS PSEUDODESLIZAMIENTOS.....	144
6.5.I	DISPOSICION FUERZAS.....	148
6.5.II	TENSOR TENSIONES.....	149

## CAPITULO 7

7.1.I	SERIE 447 (IZQUIERDA) Y CIVIA (DERECHA).....	151
7.1.II	CIVIA SERIE 465.....	153
7.2.I	RADIO LONGITUDINAL RUEDA $R_{WY}$ .....	155
7.2.II	RADIO TRANSVERSAL RUEDA $R_{WX}$ .....	156
7.2.III	RADIO TRANSVERSAL CARRIL $R_{CX}$ O BOMBEO.....	157
7.2.IV	RADIO LONGITUDINAL CARRIL $R_{CY}$ .....	157
7.3.I	CASO FISURA VELO.....	164
7.3.II	MODELO FISURA VELO.....	165
7.4. I	CASO BANDA RODADURA.....	173
7.4.II	MODELO BANDA RODADURA.....	173

# 1. INTRODUCCION



## 1.1 INTRODUCCION

¿Cuál es la parte más importante en la seguridad de la unidad ferroviaria? Mucha gente dirá diversas partes, tales como: el bogie, el eje, los rodamientos, los ejes montados, las cajas de grasa, la ruedas... En el mundo ferroviario se suele decir que el orden de importancia en seguridad es: rueda, eje y bogie [1]. Dicho lo cual, el siguiente documento se centrará en el estudio de la rueda.

Esto es así porque entre las funciones de las ruedas se encuentran las siguientes funciones: guiado del vehículo, transmisión de los esfuerzos tractores y de frenada al carril. Todo esto hace de la rueda un elemento crítico que muchas veces es el obstáculo en la evolución del ferrocarril.

Desde que se demanda mayores aceleraciones, mayores cargas por eje y mayores esfuerzos tractores por lo que se producen fisuras que antes no se producían. Dichas fisuras están causando muchos problemas en las revisiones. Las revisiones suelen ser lentas, costosas y manuales. No hay normativas ni procedimientos establecidos para estas revisiones. La forma de control depende de cada empresa con los riesgos que esto acarrea.

Las fisuras se inician en aquellos puntos donde las tensiones son más elevadas, tales como defectos producidos en la fase de fabricación o causados a posteriori durante la fase de servicio. Durante la fabricación no hay una normativa de fabricación, siendo cada fabricante el que elabora sus propios métodos de fabricación. Los fabricantes tendrán que fabricar ruedas que cumplan la normativa UNE EN 13262 [2], la cual exige unas calidades en cuanto a límites elásticos, durezas, tenacidades a fractura...

Lógicamente, el cuidado de las ruedas ferroviarias es el factor más importante en la seguridad del transporte. A pesar de no ser común que se produzcan accidentes por fallos repentinos de la rueda, estos podrían provocar un descarrilamiento, con las consecuencias en vidas y económicas puede causar. Sin embargo, se pueden producir

accidentes por fallos prolongados en la rueda o por fallos estructurales de diseño. Por ello es importante conocer el comportamiento de las fisuras y las causas de las mismas.

## 1.2 MOTIVACION

Cada vez hay más centros de investigación, entidades ferroviarias, universidades y empresas relacionadas con el mundo ferroviario que están estudiando sobre la aparición, el crecimiento, la detección y eliminación de las fisuras de las ruedas.

La necesidad de conocer mejor este fenómeno surge por varios motivos. El primer motivo es la seguridad del usuario. Aunque no es muy habitual, siempre puede haber un fallo catastrófico en las ruedas durante su uso causando un descarrilamiento. El 3 de Junio de 1998 se produjo en la ciudad de Eschede, Alemania, el descarrilamiento del tren ICE, Intercity Express, en el cual murieron 101 personas y 105 heridos [3]. Desgraciadamente, cuando ocurren estas tipos de catástrofes, se estudia con más detenimiento los problemas y se ponen soluciones para que no vuelvan a ocurrir.

El segundo es el económico. Ante un accidente ferroviario las pérdidas económicas son elevadísimas. El coste del mantenimiento en los trenes es muy alto. De estos costes casi la mitad se va a las ruedas, mayoritariamente en la detección de fisuras, defectos y reperfilados. A estos costes directos se debe añadir los costes indirectos de la parada de una unidad, que se pueden aumentar si la parada no era programada.

Aunque la competitividad que hay hoy en día en el mundo del transporte es muy grande y los costes están muy ajustados, la aparición de la alta velocidad y el aumento de confort en el transporte. Estos dos hechos hacen que el ferrocarril este en muy buena posición frente a otros medios de transporte.

Con el aumento de la conciencia medioambiental, que tiene su mayor exponente en la implantación del protocolo de Kyoto, donde se quiere usar medios de transporte menos contaminantes, el ferrocarril puede ver incrementada su utilización de manera notable y ganar en competitividad siempre y cuando los costes no sean elevados.



## 2. OBJETIVOS



## 2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos del proyecto son diversos. Atendiendo a los motivos tanto económicos y como de seguridad explicados anteriormente.

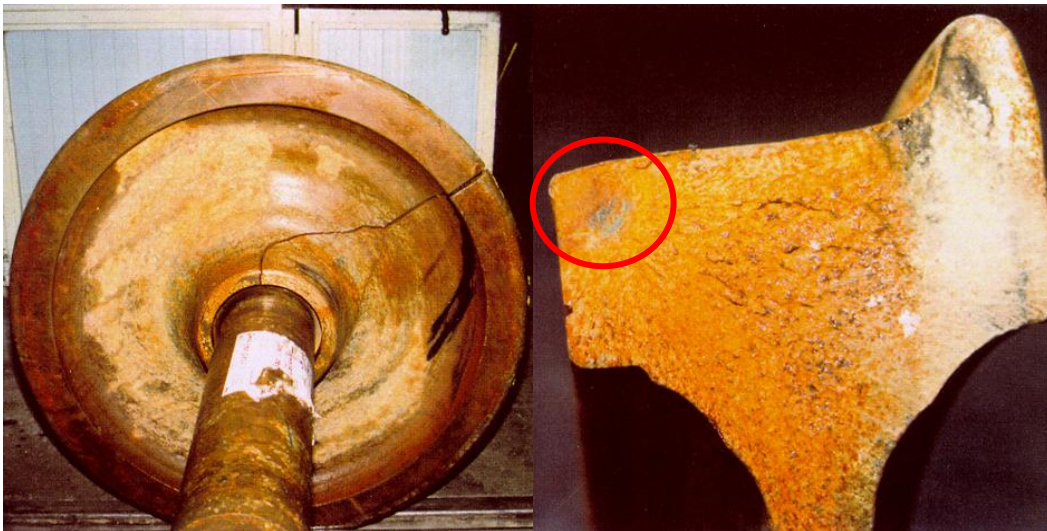
Se realizara un estudio profundo de la mecánica de la fractura y la fatiga. Al comprender mejor como funcionan dichos mecanismos en probetas y cuerpos genéricos se podrá comprender mejor el comportamiento de las fisuras en las ruedas ferroviarias. En dicho objetivo nos centraremos en el estudio del crecimiento de las fisuras en modo I, modo II, modos mixtos y compresión, así como los parámetros de diseño de fractura utilizados en la fabricación de la rueda.

El segundo objetivo, que está muy relacionado con el primero, es hacer un estudio de las teorías de contacto rueda-carril, este documento se centrara en las teorías de Hertz y Kalker. Se realizara un cálculo aproximado a las tensiones que aparecen en las ruedas ferroviarias. Para entender mejor sus futuros diseños. Aplicando la teoría lineal de contacto de Kalker calcular las tensiones con ayuda de datos recogidos de RENFE.

El tercer objetivo será calcular las longitudes críticas de fisura en las ruedas. Para ello se aproximara las ruedas a probetas genéricas sometidas a las tensiones anteriormente calculadas. La longitud crítica es la longitud a partir de la cual se da el crecimiento inestable de la fisura, con el posible fallo catastrófico de la rueda. Conociendo dicha longitud de crítica se puede establecer mejor como criterio de seguridad, para la sustitución o reperfilado de dicha rueda. También, se podrá mejorar el diseño de la rueda. Para la realización de este objetivo será necesario cumplir los dos anteriores

Cuarto objetivo, se propondrán futuras líneas de de investigaciones futuras, así como conclusiones para el diseño de futuras ruedas ferroviarias.

# 3 FRACTURA



### 3.1 INTRODUCCION

Aproximadamente un 80% de los fallos en servicio de maquinas y estructuras se deben a la fractura o fatiga de la mismas. [4] Lógicamente al igual que otros elementos, las ruedas ferroviarias se ven frecuentemente afectadas por estos tipos de fallo, por lo que el estudio de mecánica de la fractura es de suma importancia.

Desgraciadamente, ha habido numerosos accidentes que hayan ocasionado numerosas víctimas en el mundo ferroviario como el que se comento en la introducción, o el de la ciudad de Stein-Sackingen cuya foto aparece en la portada del tema. Además se pueden encontrar un amplio abanico de situaciones. [5] Por ejemplo, la rotura de un deposito de almacenamiento de gas natural licuado (Cleveland, 1944) ocasiono 128 muertos. Otros casos se dan en el mundo de aviación donde podemos encontrar la rotura de fuselaje de un avión Comet en 1954 producido por la propagación de fisuras generadas en las esquinas de ventanas cuadradas o la rotura del fuselaje de un avión Boeing 737 en 1988 debido a la propagación de una fisura generada por la oxidación de zonas remachadas.

### 3.2 DEFECTOS Y CONCENTRACION DE TENSIONES

La rotura de un material explicado de una forma muy sencilla, vendría dada por la aplicación de unos esfuerzos que conlleve un valor de tensión tal que supere la resistencia mecánica del material en cuestión. Sin embargo, este planteamiento tan sencillo solo es válido para elementos de geometría muy sencilla en la que la tensión se reparte de forma homogénea sobre superficie, como es el caso de los ensayos de tracción en probetas normalizadas.

En la realidad esto no resulta tan fácil, ya que en raras ocasiones se encuentra una distribución homogénea de tensiones, sino que las formas geométricas de la pieza, la posición y distribución de los esfuerzos, así como la presencia de discontinuidades en el material, generan un estado tensional heterogéneo, con zonas altamente tensionadas y zonas más relajadas. Por lo que resulta extremadamente difícil predecir en el tipo de condiciones de carga se va a producir la rotura del elemento

Se debe tener en cuenta que dichas discontinuidades del material, también llamados defectos, en mayor o menos medidas siempre se encuentran presentes en las piezas, y además, cada una de ellas es independiente de la otra, es decir que incluso dos piezas iguales no tienen los mismos defectos, lo que complica aún más su estudio.

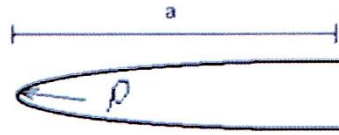
Estas discontinuidades tienen naturaleza muy diferente, podemos encontrar poros, inclusiones, precipitados, bordes de grano, etc. y a partir de ellos se nuclean las fisuras que luego pueden propagarse de forma estable, fisura subcritica, o de forma inestable, fisura critica.

Como se ha dicho, estos defectos son los causantes de las heterogeneidades en cuanto a tensión del material debido al fenómeno de concentración de tensiones. Un clásico ejemplo de este fenómeno lo encontramos si sometemos a tracción una placa que posee un taladro.

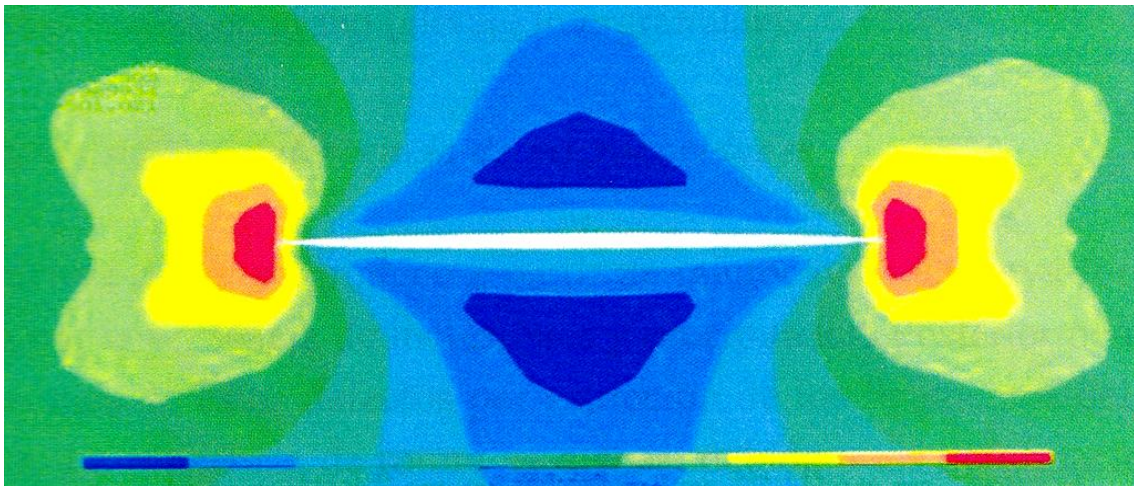
La teoría de la elasticidad nos dice que la tensión máxima se produce en los bordes del taladro y tiene un valor de tres veces la tensión remota. Esto nos indica que en los alrededores del taladro se produce una concentración de tensión, pudiéndose cuantificar a través del parámetro  $K_t$ , factor de concentración de tensiones.

La teoría de la elasticidad también permite establecer una expresión analítica de este factor, para ello se parte de la hipótesis de que el defecto presenta una geometría elíptica de semieje mayor  $a$  y radio de curvatura  $\rho$

$$K_t \approx \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)$$



Si se analiza la fórmula, cuando el radio de curvatura tiende a cero, el factor de concentración de tensiones se hace infinito, por lo que ningún material resistiría las tensiones aplicadas. Precisamente una fisura en un material se modeliza haciendo tender a cero el radio de curvatura, por lo que todas las piezas romperían, sin embargo sabemos que no es así porque aparecen otros fenómenos de plastificación en las zonas adyacentes al frente de la fisura, según se muestra en la figura, que la teoría de la elasticidad no tienen en cuenta y evita que se propague.



**FIGURA 3.2.I TENSIONES EN PUNTA FISURA**



### 3.3 MECANISMO DE FRACTURA

#### 3.3.1 CLIVAJE Y COALESCENCIA

Los principales mecanismos de fractura que se pueden producir son la fractura frágil, clivaje, y la fractura dúctil, por coalescencia de microcavidades. [6]

- **Fractura frágil: Clivaje**

La fractura por clivaje consiste en la propagación de grietas mediante la apertura de planos cristalográficos. La superficie de rotura es plana y brillante tendiendo a situarse perpendicular a la tensión principal máxima. En este tipo de fallo no se observa deformación plástica considerable ni tampoco una absorción de energía importante. El clivaje se inicia a partir de inclusiones y/o precipitados produciéndose la rotura de enlaces a través de los granos, clivaje transgranular, o a través de los bordes de grano, clivaje intergranular.

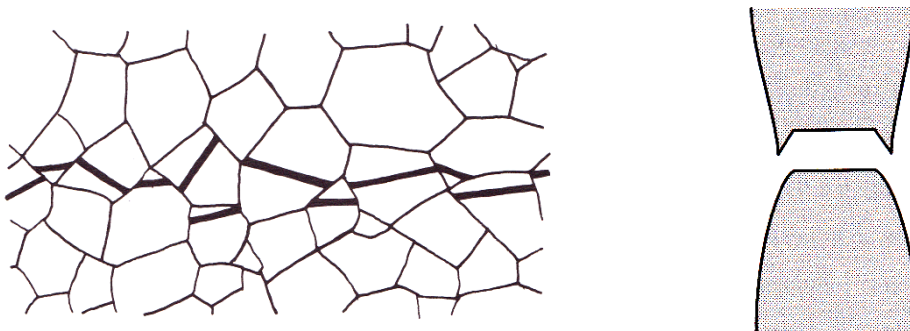
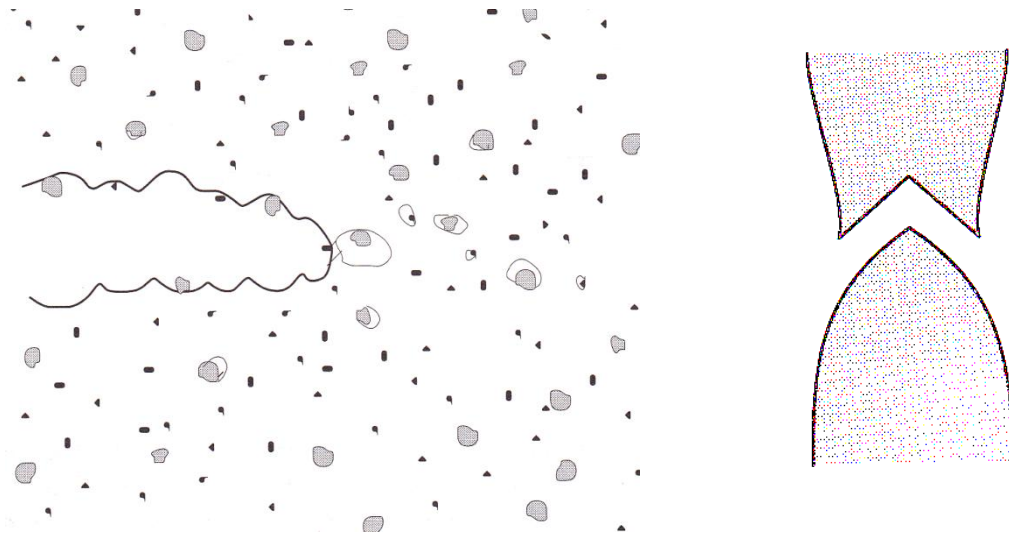


FIGURA 3.3.I FRACTURA POR CLIVAJE

- **Fractura dúctil: coalescencia de microcavidades**

La fractura dúctil se produce a partir de microcavidades cuya formación se ve facilitada por la presencia de inclusiones y precipitados. Posteriormente se produce la coalescencia de estos defectos por estricción de los ligamentos del material que los rodean. La superficie de rotura es rugosa, debido a las deformaciones plásticas producidas, tendiendo a orientarse en dirección de la máxima tensión de cortadura, a  $45^\circ$  de la tensión máxima principal. La figura muestra un esquema del proceso de la fractura dúctil



**FIGURA 3.3.II- FRACTURA POR COALESCENCIA**

### 3.3.2 MODOS DE FRACTURA

La propagación de las fisuras puede producirse de tres modos distintos.

1. Modo I – Apertura- Los labios de la fisuras se desplazan en la dirección perpendicular al plano de la fisura en sentidos opuestos



2. Modo II – Deslizamiento- Los labios de la fisura se desplazan por el plano de la misma dirección longitudinal y sentidos opuestos
3. Modo III – Desgarro- Los labios de la fisura se desplazan por el plano de la misma dirección transversal y sentidos opuestos

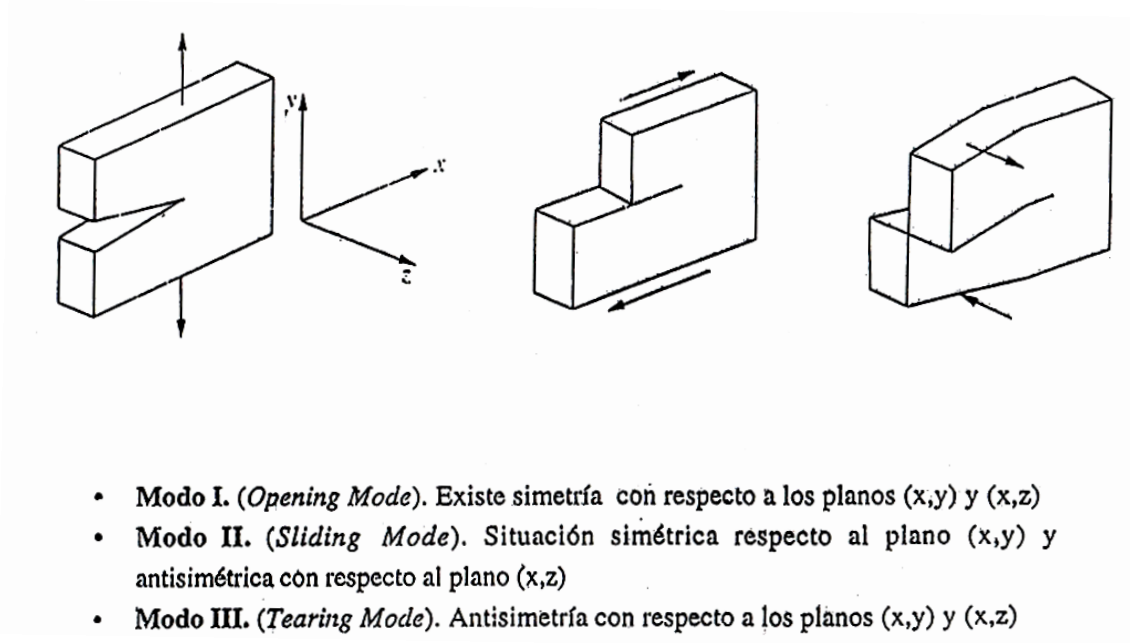


FIGURA 3.3.III- MODOS FRACTURA

La vista en dos dimensiones esquemática es la siguiente

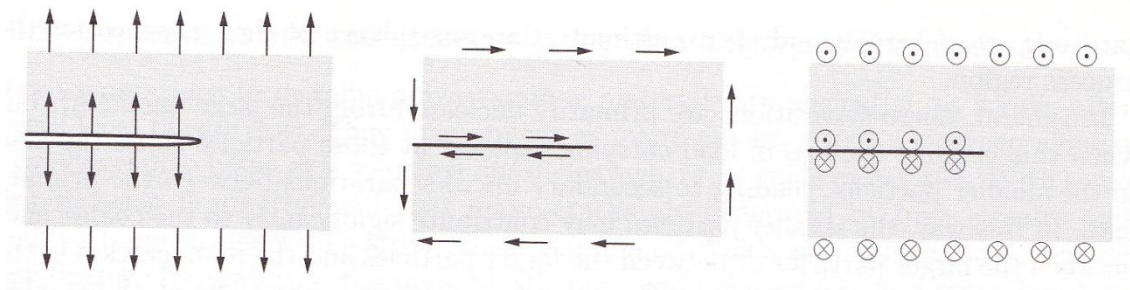


FIGURA 3.3.IV- MODOS FRACTURA EN VISTA ESQUEMATICA

En la práctica es difícil encontrar un caso de propagación de fisuras que se produzcan en un único modo. Lo habitual es encontrar situaciones en las que se combinan dos o incluso los tres modos. A estas situaciones se les llama Modos mixtos de Fractura.

Cada modo de fractura tiene un factor de intensidad de tensión. Por otro lado, se puede determinar un valor de la tenacidad de fractura para cada uno de los modos, por lo que además de la magnitud de la misma es necesario indicar el modo al cual se corresponde de la siguiente manera:

- $K_{IC}$  = Tenacidad de Fractura modo I;  $K_I$ = Intensidad tensiones en modo I
- $K_{IIC}$  = Tenacidad de Fractura modo II;  $K_{II}$ = Intensidad tensiones en modo II
- $K_{IIIC}$  = Tenacidad de Fractura modo III;  $K_{III}$ = Intensidad tensiones en modo III

En el caso de las ruedas de ferrocarril, las fisuras se inician en modo II y III principalmente. Las fisuras en modo II vienen dadas por el rozamiento con el carril durante las aceleraciones y deceleraciones, así como del rozamiento provocado por el pseudodeslizamiento cuando avanza la rueda sobre el carril. Las fisuras en modo III se produce principalmente por el movimiento sinusoidal que sufren al avanzar debido a su conicidad, a esto se le denomina movimiento de lazo. A todo esto hay que sumarle el peso propio del tren que ayudara a crear tensiones de compresión las cuales pueden favorecer el crecimiento de la fisura.

### 3.3.3 TENSIONES EN LA PUNTA DE LA FRACTURA

Las coordenadas en el problema son las siguientes. [7]

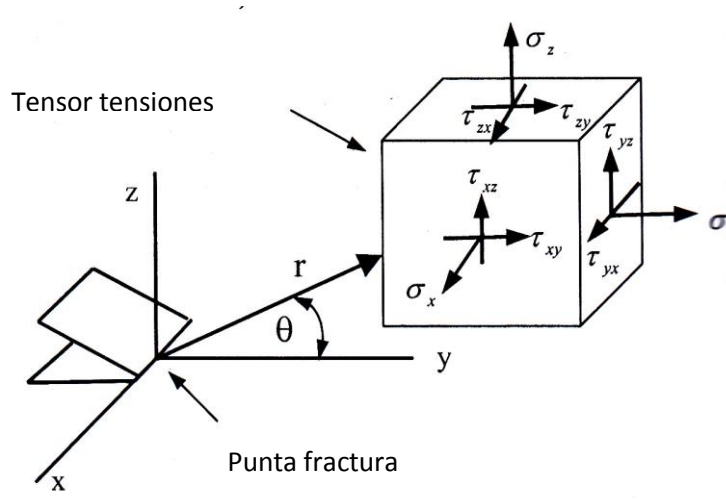


FIGURA 3.3.V- TENSIONES EN PUNTA FRACTURA

Para solucionar el problema plano de la tensión en la punta de la fractura se utilizara la función de Airy, la cual se representa con la letra griega  $\phi$ . La ecuación a resolver es la siguiente. Se resuelve en polares, ya que es mas sencilla su resolución.

$$\nabla^2(\nabla^2\phi) = 0$$

Siendo  $\nabla^2$  es el laplaciano, que en polares es igual a

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$$

Las condiciones de contorno quedarían de la siguiente forma.

$$\sigma_\theta = \tau_{\theta r} = 0 \text{ para } \theta = \pm\pi$$

Las tensiones por lo tanto quedan de la siguiente forma.

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2}$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2}$$

$$\tau_{r\theta} = - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right)$$

Las tensiones se muestran

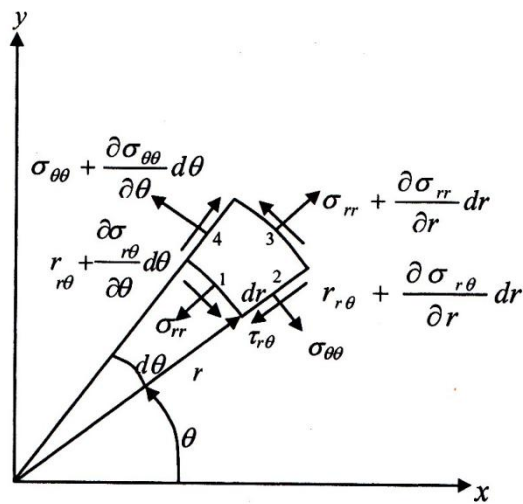


FIGURA 3.3.VI- TENSIONES EN POLARES

El resultado mostrado en coordenadas cartesianas es el siguiente.

	Mode I	Mode II
$\sigma_{xx}$	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$	$-\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$
$\sigma_{yy}$	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$
$\tau_{xy}$	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]$
$\sigma_{zz}$	0 (Plane Stress) $\nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (Plane Strain)	0 (Plane Stress) $\nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (Plane Strain)
$\tau_{xz}, \tau_{yz}$	0	0

$\nu$  is Poisson's ratio.

	Mode I	Mode II
$u_x$	$\frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 + 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$	$\frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 + 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$
$u_y$	$\frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 - 2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$	$-\frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 - 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]$

$\mu$  is the shear modulus

$\kappa = 3 - 4\nu$  (plane strain)

$\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$  (plane stress)

$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$
$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$
$u_z = \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$

TABLA 3.3.VII- TENSIONES EN PUNTA FISURA

### 3.3.4 ZONA DE PLASTIFICACION

La zona en el extremo de la grieta presenta un valor finito, ya que el sólido experimenta deformación plástica. Esta zona se llama  $r_y$  y es la solución de la zona llamada elástica, ya que utiliza el modo elástico para su resolución. Esta zona suele ser muy pequeña en comparación con la longitud de la fisura. [4]

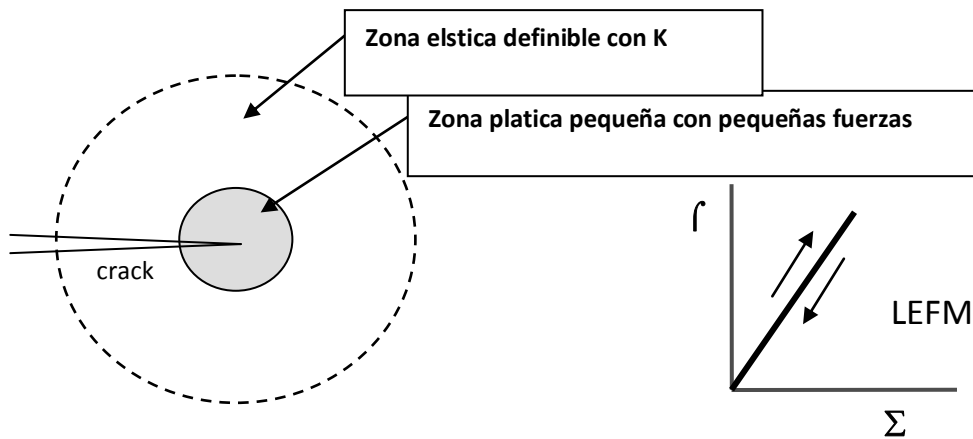


FIGURA 3.3.VIII- ZONA PLASTIFICACION PEQUEÑA. LEFM

Irwin propuso que, la zona de plastificación es mayor a esta  $r_y$  produce una redistribución de las tensiones arribas mostradas, a fin de mantener el equilibrio de fuerzas en la punta de la fisura. Es la teoría elasto-plástica. En estos cuerpos la longitud de  $r$  es comparable a la longitud de la fisura. En estos cuerpos cabe decir que habría que definir un  $K_I$  distinto al anterior para poder definir bien las tensiones.

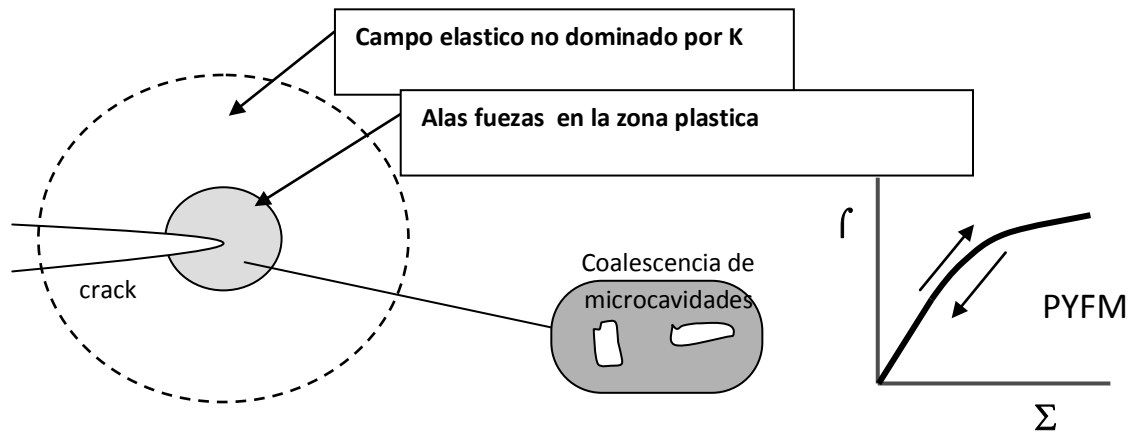


FIGURA 3.3. IX- ZONA PLASTIFICACION GRANDE. PYFM

Las zonas típicas de plastificación para probetas bajo diferente modo de fractura y distinto tipo de tensiones se muestran en la siguiente imagen

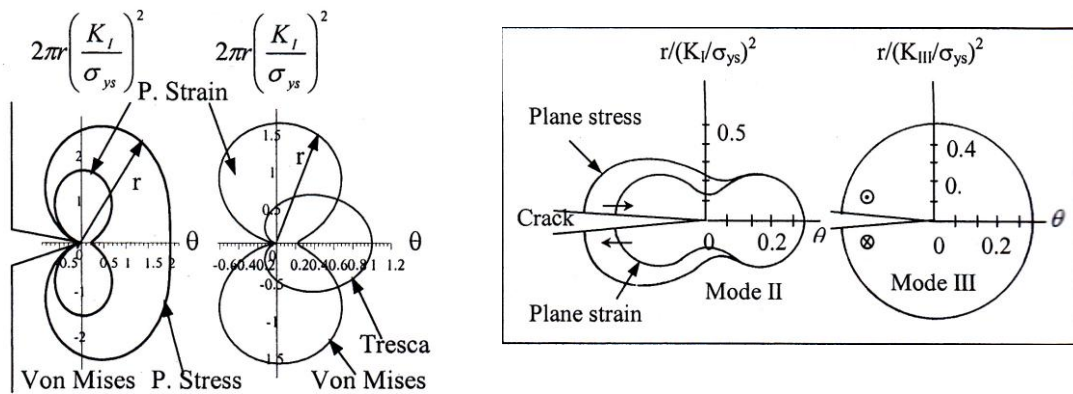


FIGURA 3.3.X- ZONAS PLASTICAS

## 3.4 PARAMETROS DE DISEÑO DE FRACTURA EN MODO I

### 3.4.1 INTRODUCCION

En el pasado ruedas monobloque se rompían inesperadamente por fractura frágil afectando a muchos ferrocarriles y llevándoles a introducir en el suministro de material test preventivos contra la fractura frágil. El mayor problema, que puede ocurrir con una rueda en servicio, es una fractura. Esta causa en general un descarrilo. Condiciones extremas, pueden afectar a los pasajeros con grandes vibraciones, dado, que la rueda es susceptible a fractura. Frenadas, particularmente si son continuas por mucho tiempo, causan un estado residual de tensiones. Muchas fracturas por bloqueo de frenado de las ruedas originan una fractura por fatiga en la banda de rodadura. Fracturas que llevan al fallo suelen estar asociadas con algún tipo de daño mecánico (huecos) o metalúrgicos (inclusiones). Altas tensores de tensiones circunferenciales en una rueda sobrecalentada promueven el crecimiento de la fractura y de este modo la destrucción de la rueda [7]. El comportamiento de las fracturas en componentes puede ser evaluado por métodos mecánicos del comportamiento de la fractura. Por esta razón es necesario conocer el valor de la rigidez a fractura  $K_{IC}$ . El crecimiento de la fractura se produce si bajo tensiones mecánicas y residuales se supera cierto valor crítico.

En 1985 “European railways” y ERRI (Instituto de investigación del ferrocarril europeo) empezaron numerosas investigaciones concernientes a los problemas en servicios debidos a los fallos en las ruedas. Los primeros estudios sobre la rigidez a fractura en 1989 por los especialistas de ERRI comité B 169. El trabajo del grupo B 169/4 después continuó con esta tarea. En este grupo, fabricantes trabajaron conjuntamente con las universidades y con los miembros de “European railways”. La tarea del grupo B 169/4 fue definir un test de rigidez a fractura para las ruedas de ferrocarril de R7. Para asegurarse que el procedimiento elegido puede ser reproducido y repetido todo el tiempo y todas las veces sin influencia de los parámetros del test, se



examinaron los valores obtenidos y se propuso un valor de  $K_{IC}$ , para las ruedas de acero R7.[8]

En el año 1991, ferrocarriles suizos estuvieron afectados con fuertes descarrilamientos y desde ese año el Instituto de metalurgia se implicó por su cuenta en la cuestión de cómo definir mejor los materiales de la rueda y como usar la mecánica de la fractura en el contexto de los ferrocarriles. Los resultados obtenidos de los descarrilamientos en Stein-Säckingen mostraron claramente que la rigidez de la rueda rota fue insuficiente.

### 3.4.2 TENACIDAD A FRACTURA $K_{IC}$

Para el caso de las piezas fisuradas, el criterio de diseño convencional ha sido sustituido por el siguiente criterio.

$$K_I < K_{IC}$$

Donde  $K_I$  representa al factor de intensidades de tensiones el cual depende de la geometría de la pieza, las cargas exteriores aplicadas y la longitud de la fisura quedando una expresión de la siguiente forma.

$$K_I = \beta \sigma (\pi a)^{1/2}$$

Donde  $\beta$  es una constante que de la geometría del elemento estudiado, en los anexos aparecen diferentes valores para  $\beta$  según sea la geometría de la placa,  $\sigma$  es la tensión aplicada en dicho elemento, mientras que  $a$  es la longitud de la fisura.

Por su parte  $K_{IC}$  representa al factor de intensidad de tensiones crítico que depende del material de la pieza el espesor de la misma, la temperatura y la velocidad de sollicitación. En las siguientes figuras se ve como varía  $K_{IC}$  en función de los siguientes parámetros.

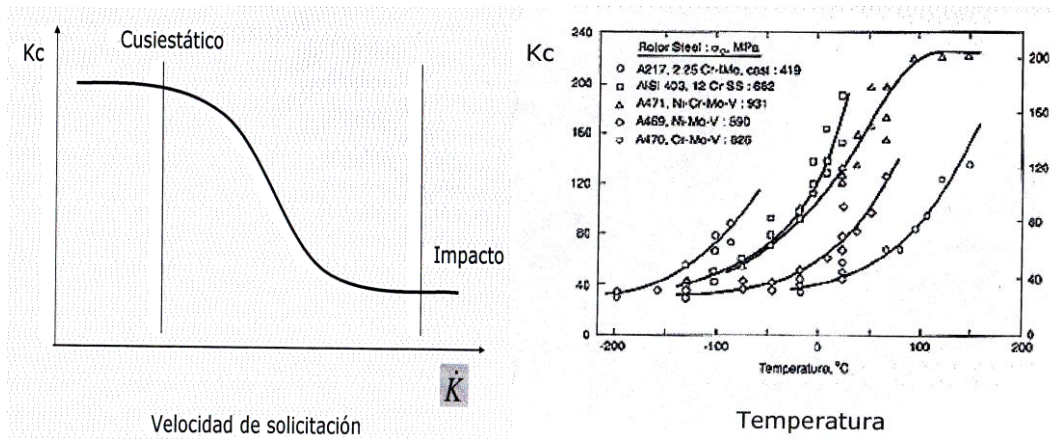


FIGURA 3.4.I TENACIDAD A FRACTURA FRENTE A OTROS FACTORES

Este  $K_{IC}$  cumple las condiciones de deformación plana dominante, asociado al espesor de probeta, y estado de cargas cuasiestáticos recibe el nombre de Tenacidad de Fractura, el cual es un parámetro del material.

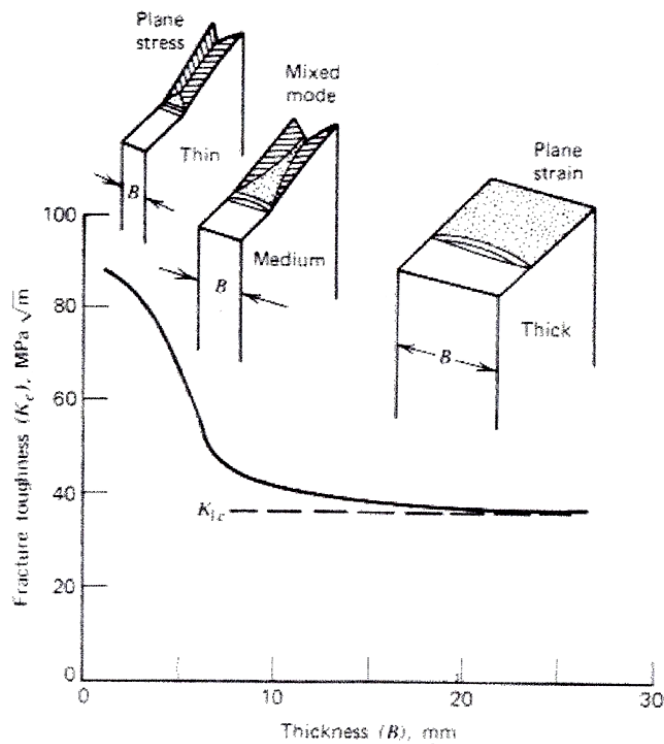


FIGURA 3.4.II- RIGIDEZ A FRACTURA FRENTE AL ESPESOR DE LA PROBETA

El modo de obtenerlo es la siguiente. Se coge una probeta con una entalla como las que se muestran en la siguiente figura y se les somete a fatiga para crear una fisura. Las normativas que se siguen para estos experimentos son la ASTM E399 y la BS 5447. En el mundo del ferrocarril las probetas utilizadas son las CT 30 que serán explicadas más adelante. Se las somete a un incremento de carga y descarga.

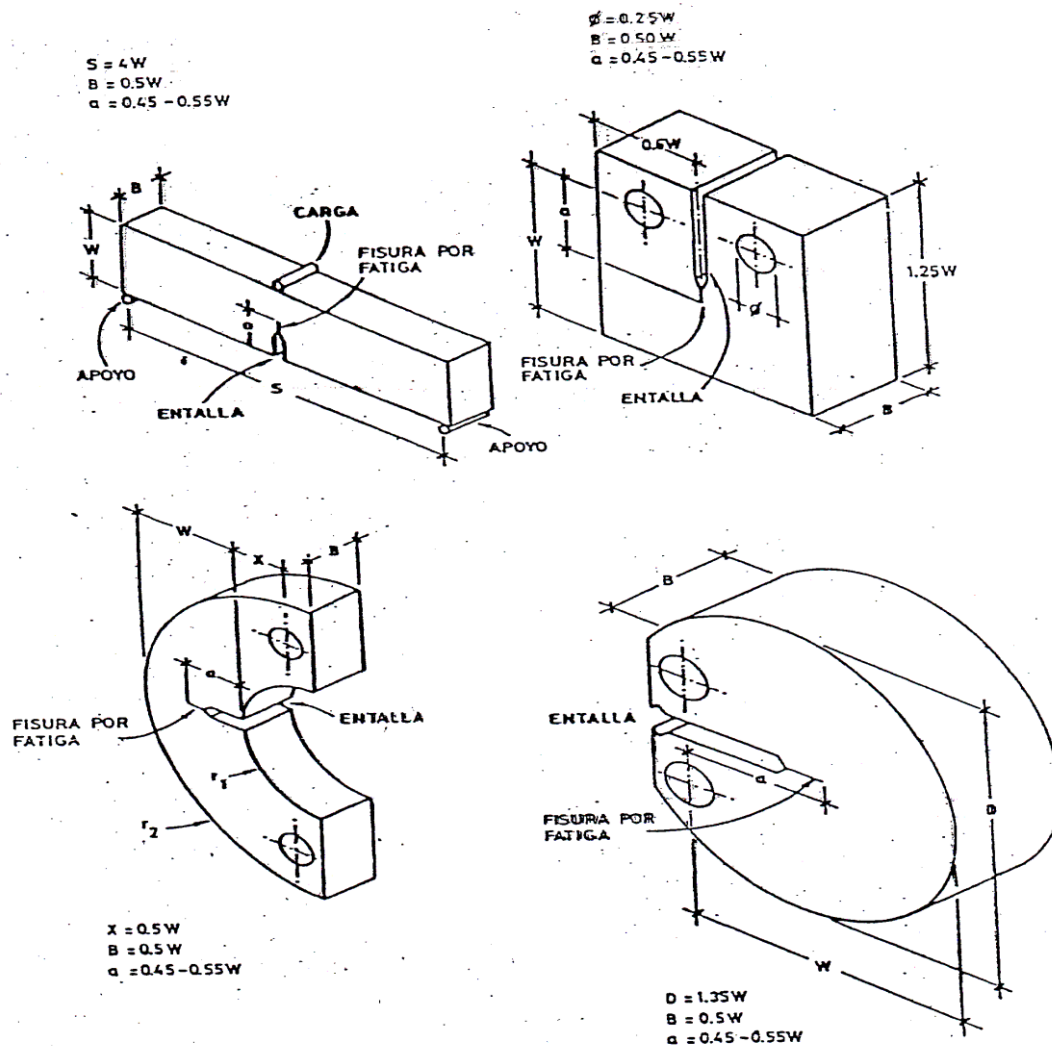


FIGURA 3.4.III- PROBETAS PARA ENSAYO DE MODO I

Las graficas que suelen salir son las siguientes. Para calcular el punto  $P_Q$  se utiliza el método de la secante del 5% que corta a la curva carga desplazamiento. Es una recta que pasa por el origen con una pendiente igual al 95% de la parte lineal de la curva  $P$  frente a  $u$

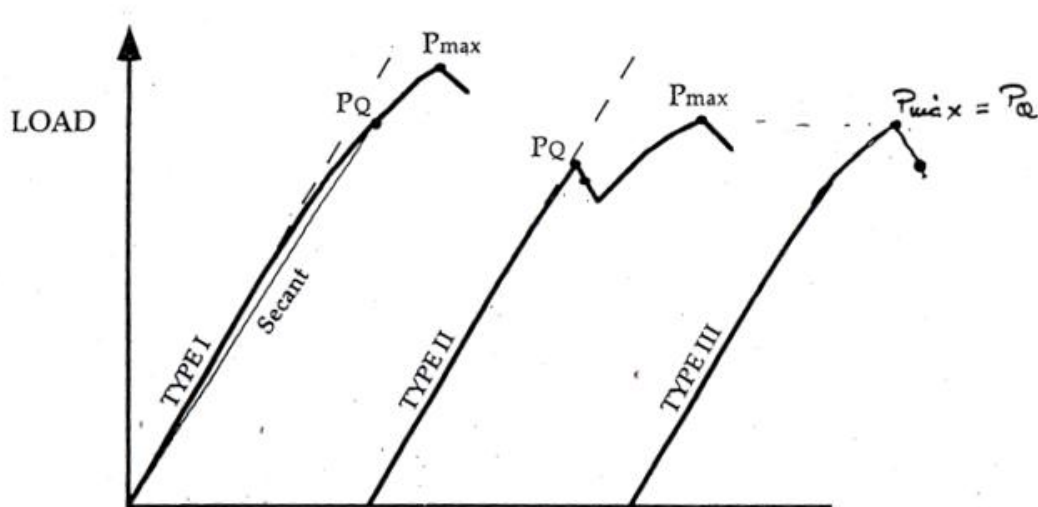


FIGURA 3.4.IV- TIPOS DE GRAFICA EN EL EXPERIMENTO DE DETERMINACION DE  $K_{IC}$

Una vez que se tienen los valores posibles para  $K_{IC}$ , se tiene que cumplir las dos siguientes condiciones: criterio de anchura y criterio de carga máxima.

- Test de Criterio de anchura

$$B, a \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{R_{p0.2}} \right)^2$$

B grosor del material, a longitud de la fractura

$R_{p0.2}$  límite elástico

- Ratio de carga máxima

$$P_{max}/P_Q \leq 1.1$$

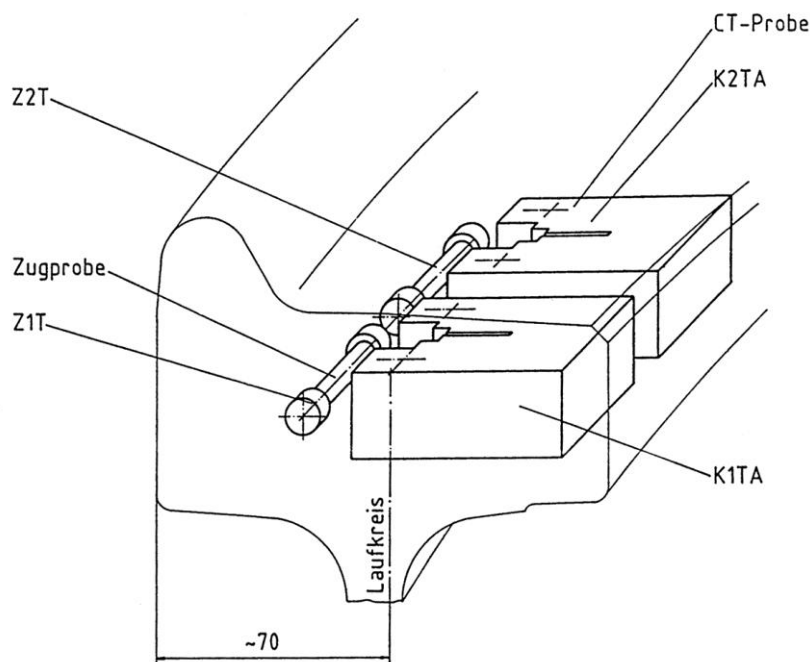
Si se cumplen todos los requisitos el valor calculado es el de  $K_{IC}$ , tenacidad de fractura, si no el valor se conoce como  $K_Q$

### 3.4.3 $K_Q$ RIGIDEZ A FRACTURA

La normativa EN 13262[1] exige lo siguiente:

- Para ruedas de acero ER7, en seis probetas el valor medio debe ser mayor de 80  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , teniendo que ser cada nivel individual mayor a 70  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
- Se realizara dichas pruebas solo a ruedas frenadas por zapata tanto en freno de servicio como de estacionamiento
- Se realizara dicha prueba para una rueda de cada lote.

Las probetas para realizar la prueba serán las siguientes.



**FIGURA 3.4.V- PROBETA CT30**

Las ruedas de la normativa UIC pueden romperse en servicio como resultado de tensiones residuales debidas a los frenazos. La rigidez a fractura de dichas ruedas generalmente está entre 40  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  y 80  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Investigadores mostraron en una

mesa de frenos que ruedas con un  $K_Q$  mayor a  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  no rompen mientras que ruedas con un  $K_Q$  de  $65 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  pueden romper. Este resultado está confirmado por medidas en ruedas que rompieron en servicio. De este modo, hay necesidad de modificar las condiciones de suministro de modo que la rigidez de fractura mínima sea de  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

El modo de la realización del experimento es el mismo que para  $K_{IC}$ , lo único exigido es que la probeta sea CT30

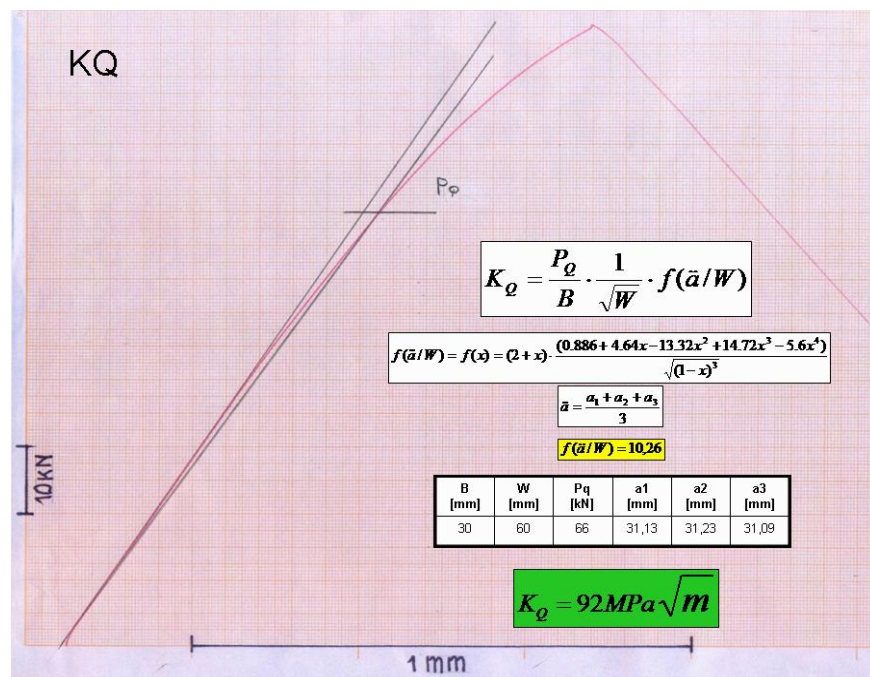


FIGURA 3.4.VI- CURVA CARGA DESPLAZAMIENTO PARA EL TEST  $K_Q$

La intensidad de tensión  $K_Q$  se determina de la siguiente forma:

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

W: ancho de la muestra CT

$f(a/W)$ : función de geometría

Si se cumplen los criterios de ratio y de ancho de probeta el valor calculado  $K_Q$  es igual a la rigidez de fractura del material  $K_{IC}$  y en este caso es un parámetro del material. [9] En las siguientes figuras se muestran dos experimentos con dos probetas diferentes, en la izquierda  $K_Q$  coincide con la tenacidad a fractura; mientras que en la derecha no coinciden.

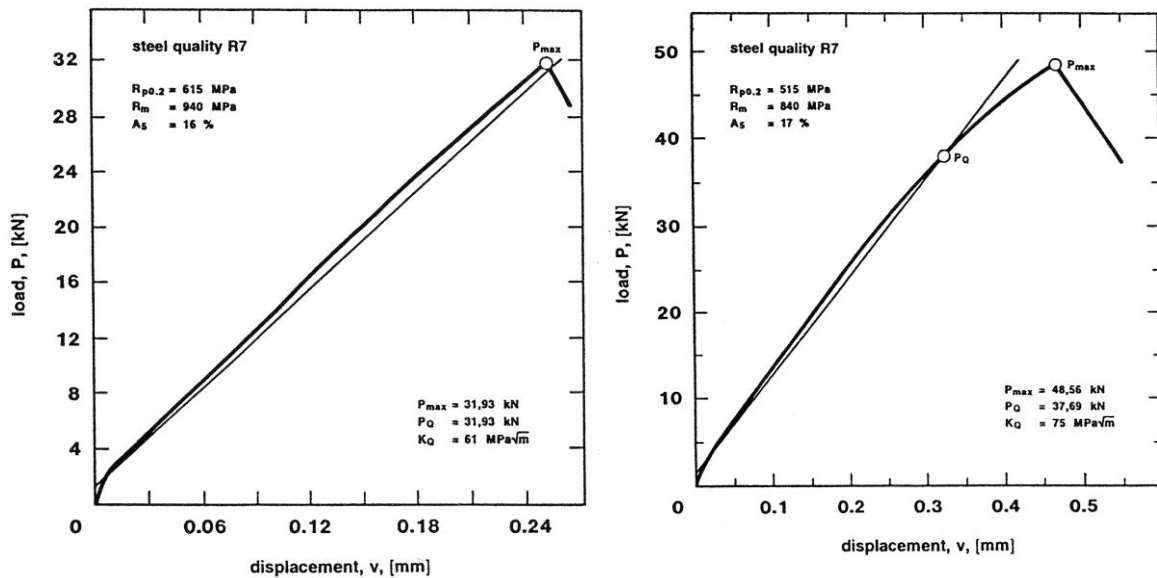


FIGURA 3.4.VII- CURVAS DESPLAZAMIENTO

Esto confirma que el comportamiento de los materiales en los cuales se da fractura frágil ocurre para  $P_{max}$ . La superficie de la fractura es lisa y no muestra ninguna deformación en sus caras (ver siguiente figura de la izquierda). La curva carga-deformación en la FIGURA 3.4.VII muestra un incremento adicional en el desplazamiento después de la parte lineal de la curva. En este ejemplo, las condiciones de ratio de carga o ancho de probeta no se cumplieron. La apertura crítica de las fracturas es mayor que en los ejemplos anteriores. Después de alcanzar  $P_{max}$  volvió a ocurrir la fractura frágil. De este modo, en ciertos casos  $K_Q$  se puede considerar igual a  $K_{IC}$  bajo ciertas condiciones.



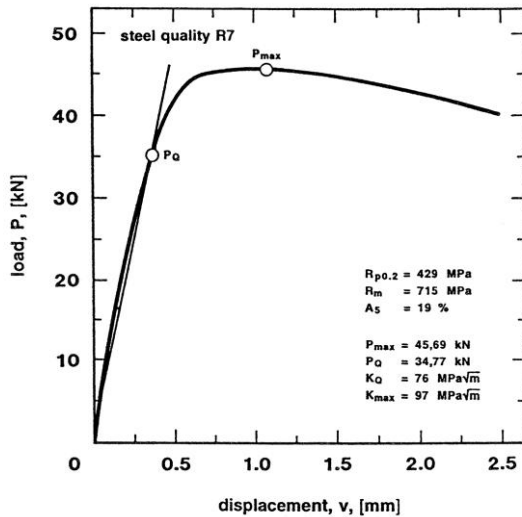


FIGURA 3.4.VIII- CURVAS  $K_{MAX}$  Y MUESTRAS CT30 FRACTURADAS

Otro tipo de comportamiento se muestra en la **FIGURA 3.4.VIII**. No hay crecimiento inestable de la fisura, lo cual produce inmediatamente la fractura frágil. La normativa E 399 de ASTM no puede ser aplicada. Alguna vez puede ser útil reemplazar  $K_Q$  por  $K_{max}$ , lo que representa un mejor comportamiento del material. Sin embargo, los resultados obtenidos permiten algunas aplicaciones de la mecánica de fractura. En ningún caso la curva carga-desplazamiento debe ser analizada.

En las investigaciones del ERRI grupo de trabajo B 169/4, la normativa E 399 de la ASTM fue elegido como método para medir la rigidez a fatiga. Fue demostrado, que el resultado  $K_Q$  no está influenciado por ningún parámetro del test y que el experimento es reproducible y repetible. Usando un diseño experimental y los métodos de Taguchi [10] se pueden definir y optimizar diferentes parámetros de los test de la mecánica de la fractura. Una matriz de test con un total de 9 parámetros (factores A-I) de diferentes niveles (ver tabla) fueron establecidos por los test. La matriz usada ha sido seleccionada de los vectores ortogonales de Taguchi. Los resultados obtenidos del experimento también dictan combinaciones de parámetros de la tabla permitiendo así la definición del mejor valor de la rigidez a fractura. El resultado más importante es que el valor de  $K_Q$  se encuentra entre  $78 \text{ MPa}\sqrt{m}$  y  $85 \text{ MPa}\sqrt{m}$ . Después de tener un conjunto de tolerancias, esto tiene que ser probado por fabricantes, los cuales desean que la rigidez a fractura pueda ser alcanzada en la producción industrial. Métodos apropiados para asegurar la calidad deben garantizarse en los niveles requeridos para este valor.



Pos.	Factor	Level	AG B 169/4
A	Laboratorio	1 - 6	*
B	Fabricante	1 - 6	*
C	Espesor de la muestra	1 25 mm	C 2
		2 30 mm	
		3 35 mm	
D	Posición de la Muestra en la llanta	1 tangential, agujero hacia la cara exterior de la pestaña	D 1
		2 radial, agujero hacia la banda de rodadura	
		3 radial, agujero hacia el cubo	
E	Temperatura	1 +20° C	E 1
		2 - 10° C	
		3 - 40° C	
F	Medida del desplazamiento	1 cara externa	F 1
		2 linea de la carga	
G	Surcos laterales	1 con	G 2
		2 sin	
H	Empezando en agujero	1 directo	H 2
		2 chevron	
I	Ratio de carga	1 $K = 0.55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$	I 1
		2 $K = 2.75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$	
J	Repeticiones	1 - 9	6

\* sin determinar

**TABLA 3.4.I: Factores determinados con diferentes niveles para configurar el método de la matriz. Los niveles sombreados indican los mejores valores para la determinación de la rigidez a fractura fijados por el grupo B169/4 de ERRI.**

Al lado del trabajo del grupo B 169/4 de trabajo de ERRI, Lucchini sidermeccanica procedió a caracterizar el acero R7T, no sólo en términos de la

mecánica de fractura elástica lineal (LEFM), sino también en términos de la mecánica de fractura plástica (PYFM).

El resultado más importante de la mecánica de la fractura elástica lineal es que el proceso liberación y absorción de energía esta correlacionada con la iniciación del crecimiento de la fisura esta dado sólo con el parámetro de intensidad  $K$ , una medida de la resistencia de la fisura del material  $R$ . La rigidez a fractura  $K_{IC}$  es el factor de intensidad de tensión crítico en condiciones lineales elásticas. La estabilidad de la fisura en ciertas condiciones de carga es descrita por el cálculo entre el valor de  $K$  y el valor de  $K_{IC}$ .  $K_Q$  describe el campo de tensión elástica en la punta de la fractura. Cuando  $K_Q$  alcanza el valor  $K_{IC}$ , ocurre la fractura. Si la zona de plastificación  $r_p$  en la punta de la fisura es pequeña, el campo elástico está gobernado por  $K_Q$  que controla todo el proceso en esa zona.

Cuando  $r_p$  crece, no es posible encontrar un campo elástico en la punta de la fisura que es independiente de la geometría. Por eso, hay una gran interacción entre la zona plástica y la zona elástica. La dependencia entre el campo plástico por el grosor de la muestra lleva a una dificultad en la práctica. En otras palabras, una factura producida en el laboratorio en pequeñas muestras no es representativa para la estructura en servicio. La aparente rigidez a fractura  $K_Q$  puede dotar una evaluación parcial de la rigidez a fractura de las ruedas que no tienen suficiente poco grosor en la llanta para tener un estado plano de tensiones. Por estas razones, las ruedas de los ferrocarriles no tienen suficiente poco grosor para ser un estado plano de tensión en la punta de la fisura. Además, las mejoras de las características de los materiales para las ruedas muestran que simplemente el parámetro  $K_{IC}$  no puede representar la zona plástica alrededor de un agujero.

Para determinar la rigidez a fractura de una rueda en condiciones plásticas, se necesita otros parámetros de la mecánica de la fractura. Hay que presentarlos y estudiarlos.

### 3.4.2 $K_{EE}$ RIGIDEZ DE LA ENERGIA EQUIVALENTE

La integral  $J$  es uno de los más representativos parámetros de la mecánica de fractura, pero el método de determinarlo es caro y consume mucho tiempo. Hay otro parámetro, correlacionado con energía, llamado  $K_{EE}$ , que muestra muchas similitudes con  $J_{IC}$  y  $K_{IC}$  respectivamente, sin embargo es muy fácil de obtener. [8]

Para seleccionar este parámetro innovador, se presta mucha atención al diagrama carga-desplazamiento. De hecho, es una variación en la linealidad como se ve en la **FIGURA 3.4.VIII** no hay propagación inestable de la fisura, pero hay un progresivo incremento en la zona baja de la zona plástica del agujero y alrededor de la punta de la fisura, donde se da las mayores tensiones. Si se analiza la forma de la curva carga-desplazamiento queda claro que el área representa la energía absorbida antes del fallo inesperado de la muestra en las condiciones plásticas.

Por esta razón Lucchini Sidermeccanica selecciono la energía equivalente para determinar la rigidez a fractura conforma a la normativa E992-84 de la ASTM, el procedimiento del test ha sido usado para caracterizar nuevos materiales forjados que operaran en el extranjero.

Mediciones de  $K_{EE}$  dan un método simple y económico para determinar la rigidez a fractura en muestras pequeñas, que usualmente no están en un estado de plano de tensiones. Si se compara las metodologías de evaluar  $K_Q$  y  $K_{EE}$ , se pueden observar similitudes pero también algunas diferencias. El parámetro  $K_Q$  no es similar a parámetros del material  $K_{IC}$ , como este depende de la geometría y dimensiones de la muestra.  $K_{EE}$  combina con  $K_Q$  que pueden dar mucha información de la rigidez a fractura de las ruedas. Puede ser fácilmente para definir un criterio completamente aceptado del material. De hecho, ambos parámetros  $K_Q$  y  $K_{EE}$  pueden ser evaluados con solo un test CT 30 [1] que es una tremenda ventaja en términos de tiempo y coste.

El parámetro  $K_{EE}$  es calculado de acuerdo con la normativa usando la curva carga-desplazamiento. Como se muestra en la siguiente figura

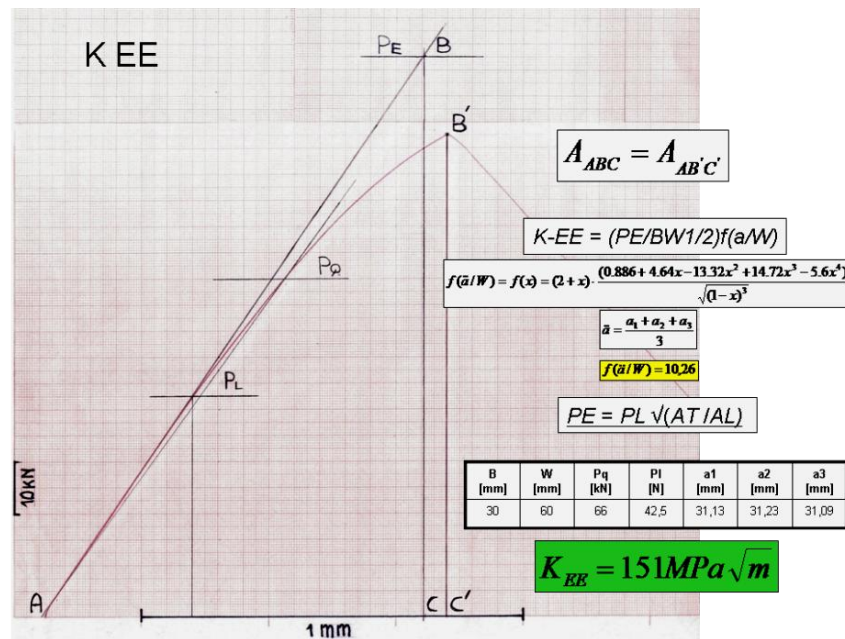


FIGURA 3.4.IX- CURVA REPRESENTATIVA DE  $K_{EE}$

Para hallar  $P_L$  hay que apoyarse en el COTD, que también puede ser calculado con este mismo test.

El primer test usando el parámetro COTD conforme a las normativas BS5762 y BS7448. Wells introdujo el parámetro CTOD en 1961. El original supuesto fue que el comportamiento de la punta de la fisura puede ser representado por el desplazamiento entre los planos de dos fisuras.

Resultados experimentales muestran que la iniciación de la fisura siempre es al mismo nivel de fuerza y que el CTOD puede describir el proceso, en las condiciones plásticas y elásticas. El CTOD es medida del test CT 30 usado para obtener los parámetros  $K_Q$  y  $K_{EE}$ . La metodología y las facilidades son prácticamente las mismas. En la Fig. 9, se puede ver un diagrama y los resultados del test CTOD aplicado a la muestra CT 30

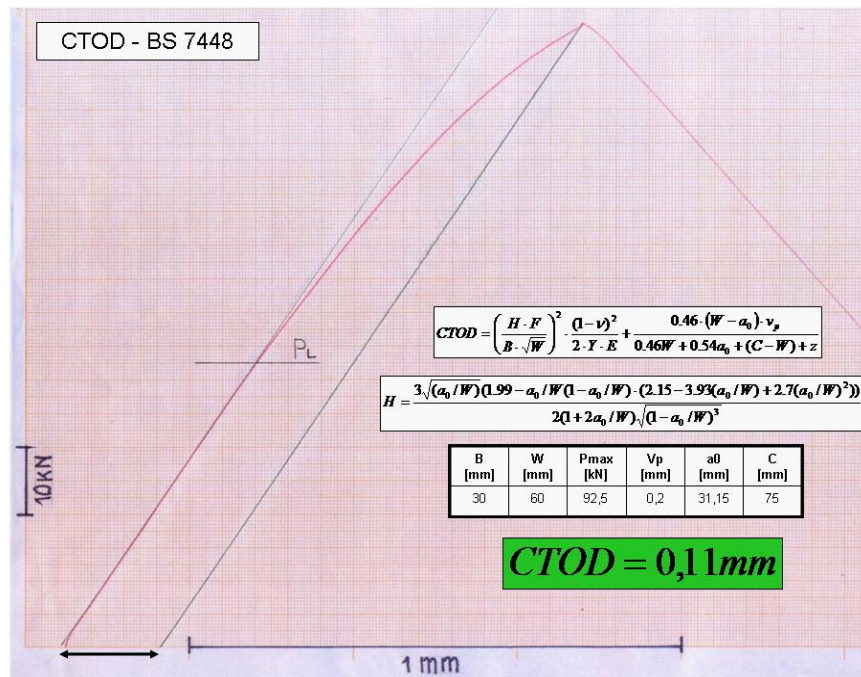


FIGURA 3.4.X REPRESENTACION DE CTOD

Los test realizados por Lucchini Sidermeccanica muestran dos cosas:

- Diagramas carga-desplazamiento y valores de los parámetros  $K_Q$  y  $K_{EE}$
- Fotografías de la superficie de la fractura

La evaluación muestra tres importantes rasgos:

- Ruedas con alta rigidez a fractura en términos de  $K_Q$  y  $K_{EE}$
- Ruedas con baja rigidez a fractura en términos de  $K_Q$  y  $K_{EE}$
- Ruedas con el mismo valor de  $K_Q$  tienen diferentes de  $K_{EE}$

Parámetros elásticos y plásticos de la mecánica de la fractura aplicada a ruedas

Curva carga-desplazamiento de dos materiales de ruedas con diferentes valores de  $K_Q$  y  $K_{EE}$

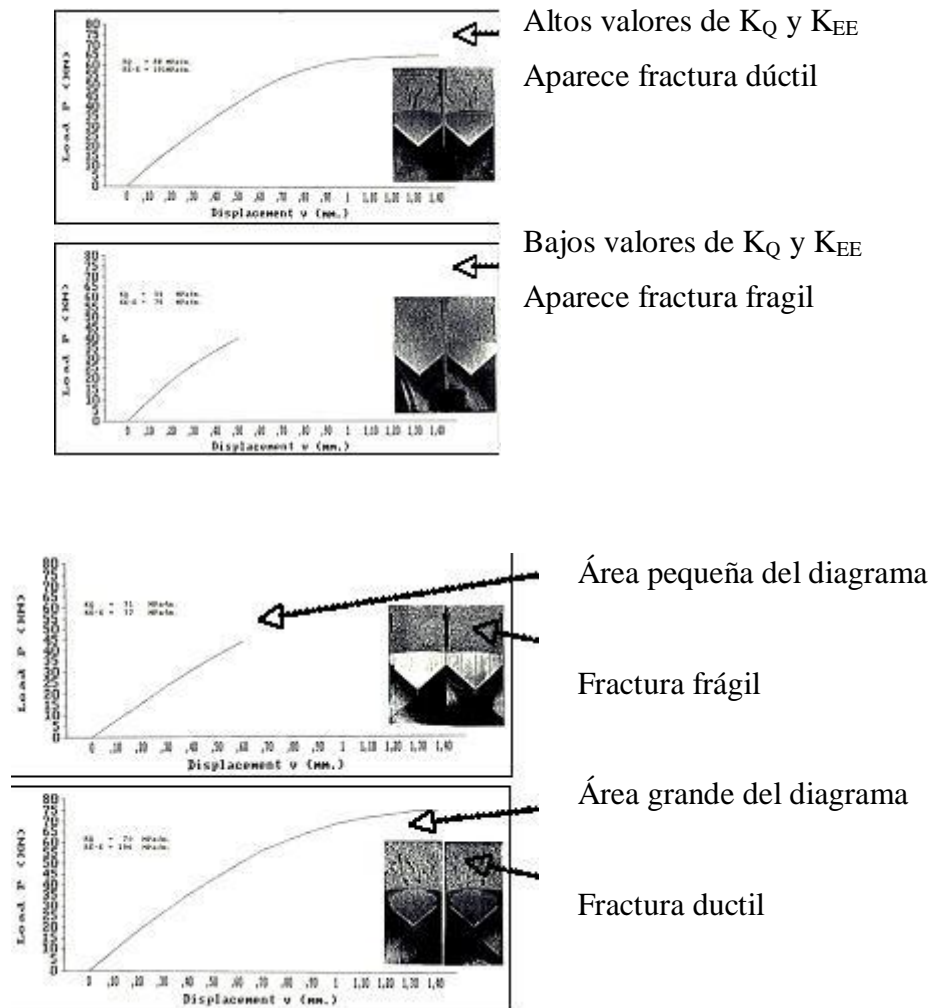


FIGURA 3.4.XI- CURVA CON DIFERENTES VALORES DE  $K_{EE}$  Y  $K_Q$

Si  $K_Q$  es mayor que un valor umbral, se asume 80 que es lo que exige la normativa, el conocimiento de  $K_{EE}$  dará mayor información sobre el comportamiento del campo elastico-plastico, pero esto no es necesario. Sin embargo, si  $K_Q$  es menos de este valor umbral, el estudio de  $K_{EE}$  es esencial.

- Si  $K_{EE}$  es menor que un valor umbral, esto puede confirmar la baja rigidez a fractura del material



- Si  $K_{EE}$  es alto, el material puede ser utilizable, aunque  $K_Q$  sea bajo.

El instituto de metalurgia obtuvo hasta ahora más de 300 valores de rigidez a fractura de ruedas rotas y sin romper fuera de servicio y de realizar test, por supuesto que con diferentes métodos. Todos los datos son para aceros De calidad R7

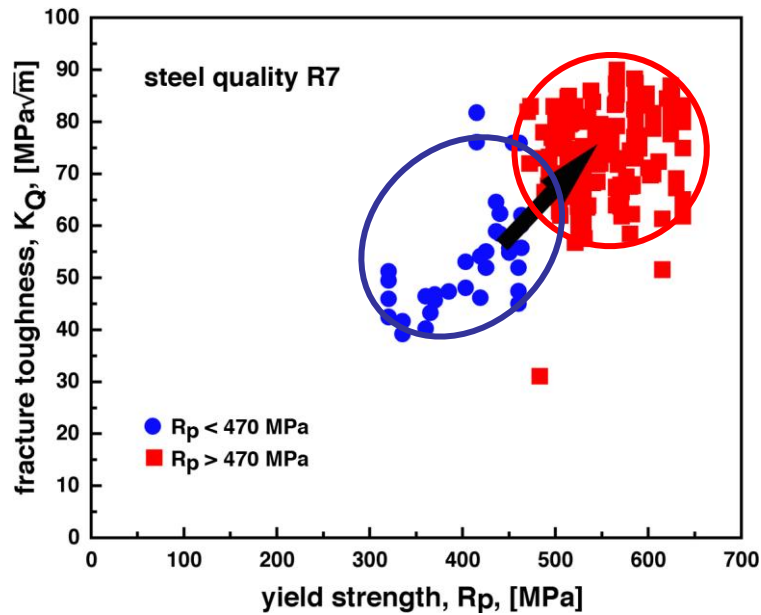


FIGURA 3.4.XII- RIGIDEZ A FRACTURA FRENTE A LIMITE ELASTICO

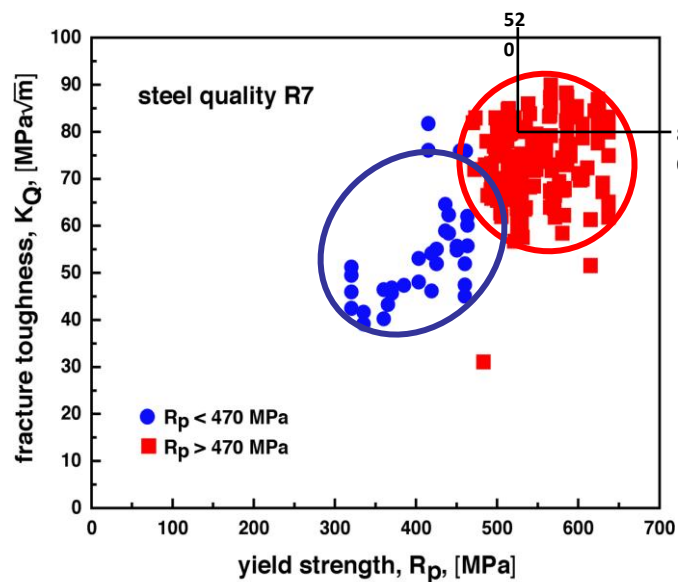


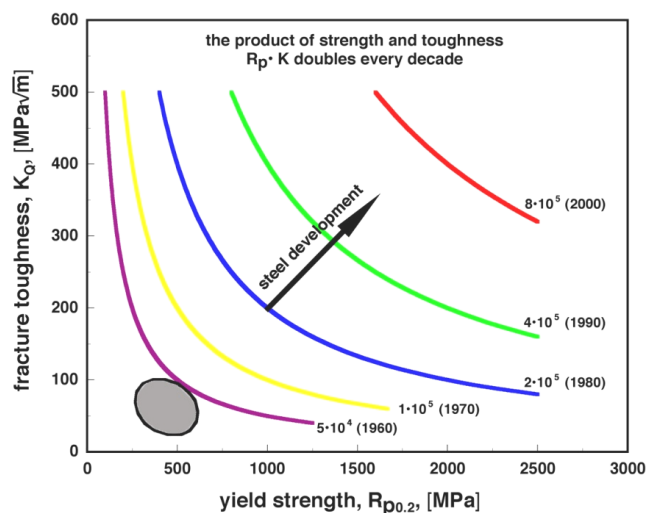
FIGURA 3.4.XIII- RIGIDEZ A FRACTURA PINTADA FRENTE A LIMITE ELASTICO CON EXIGENCIA DE LA NORMATIVA



Un buen método para mostrar la calidad del material en el sentido de buen producto es por su rigidez junto a su resistencia. En la **FIGURA 3.4.XI**, los valores de rigidez están divididos en dos secciones: aquellos en los que el límite elástico es menor de 470 MPa y otros en los que límite es mayor a 470 MPa. Casi todos los valores de  $K_Q$  para el primer grupo estan por encima de  $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Se puede observar un cambio tomado por los dos valores, límite elástico y rigidez. Esto define un segundo grupo de valores. Se puede decir que el cambio de valores es la dirección correcta: mayores límites elásticos y mejores rigideces.

Los límites de rigidez y elásticos se muestran en la figura 17 para aceros R7. Sólo unas pocas ruedas de las probadas alcanzaron la condición de  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con una fuerza de 520 MPa pero se puede hacer notar que se alcancen estos valores con estos procedimientos.

Los test del grupo B 169/4 muestran que el valor  $K_Q$  puede estar entre 78 y 75. La necesidad de una rigidez mayor junto a grandes fuerzas es conocida. Un buen índice de calidad para las propiedades mecánicas del acero es el producto de la rigidez a fractura con el límite elástico. Esta relación se indica en la figura 17. Los aceros modernos han doblado este índice de calidad cada década desde el 1960. El área sombreada en la siguiente figura se muestra la dispersión de los aceros R7.



**FIGURA 3.4.XIV- PRODUCTO LIMITE ELASTICO FRENTE A RIGIDEZ A FRACTURA**

### 3.4.4 PARAMETRO J

Se define el parámetro J como la siguiente integral de línea. [5]

$$J = \int w dy - \bar{T} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} ds$$

w la densidad de energía de deformación

T es el vector de tracción

u es el vector de desplazamiento

La integral J es invariante. Si los labios de la grieta se suponen descargados, el resultado de la integral es independiente del camino recorrido, siempre y cuando se elija un contorno en el que se empiece en la zona inferior del labio, se rodee la punta de la grieta y termine en el labio superior.

Para sólidos elásticos lineales como es el J=G. Siendo G la tasa de liberación de energía. G tiene los siguientes valores teóricos

$$G_{\text{tension\_plana}} := \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E}$$

$$G_{\text{deformacion\_plana}} := \left( \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E} \right) \cdot (1 - \nu^2)$$

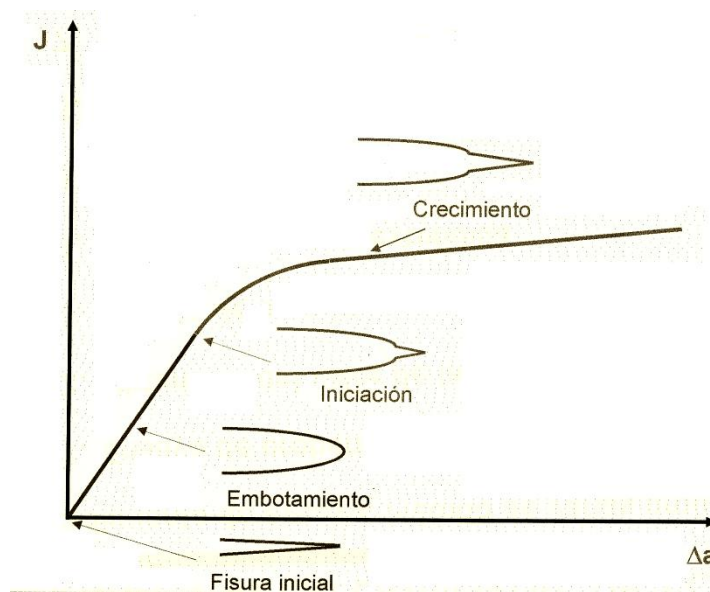
La solución del problema HRR (Hutchinson, Rice y Rosengren) sobre las tensiones que aparecen en la fisura, utiliza J como caracteriza las condiciones en el fondo de la grieta en el material.

Entonces, J es un parámetro de intensidad de tensiones para zonas de la grieta donde el campo plástico es dominante. Por dicho motivo, Se podrá crear un criterio de

fractura, en el cual si  $J$  es mayor que un parámetro crítico se fracturara el material que sea  $J_I > J_C$ .

$J_I$  depende de la geometría, de las cargas exteriores y de la longitud de la fisura.  
 $J_C$  depende solo del material.

La grafica de  $J$  frente al incremento de la fisura,  $\Delta a$ , es la siguiente.



**FIGURA 3.4XV INTEGRAL J FRENTE A INCREMENTO DE FISURA**

Para la determinación del  $J_C$ , es similar al  $K_{IC}$ , de hecho pueden coincidir si la zona plástica es pequeña. Se puede hacer con una sola probeta o con varias.

Si es con una probeta se realizan ciclos de carga y descarga. Como se muestra en la figura.  $J$  es el área debajo de cada parte. Se consigue una curva de la siguiente forma.

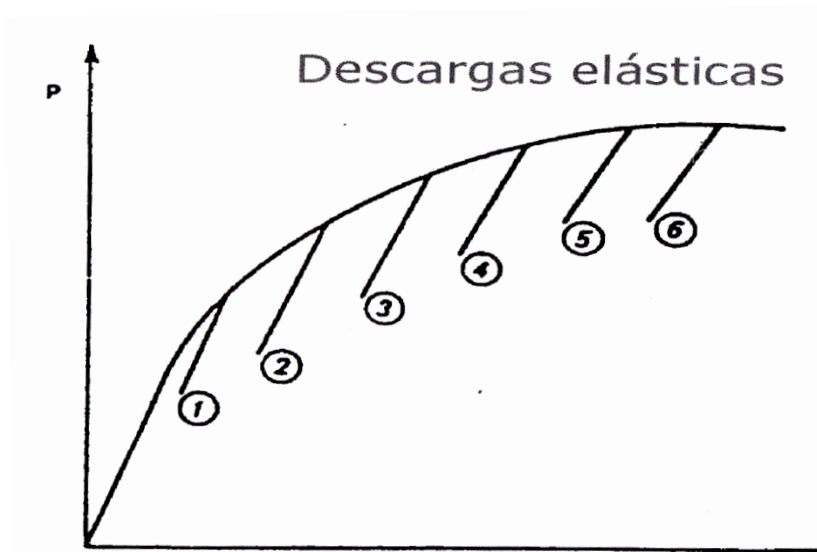


FIGURA 3.4.XVI- CARGAS Y DESCARGAS EN ENSAYO CON UNA PROBETA PARA DETERMINAR  $J_{IC}$

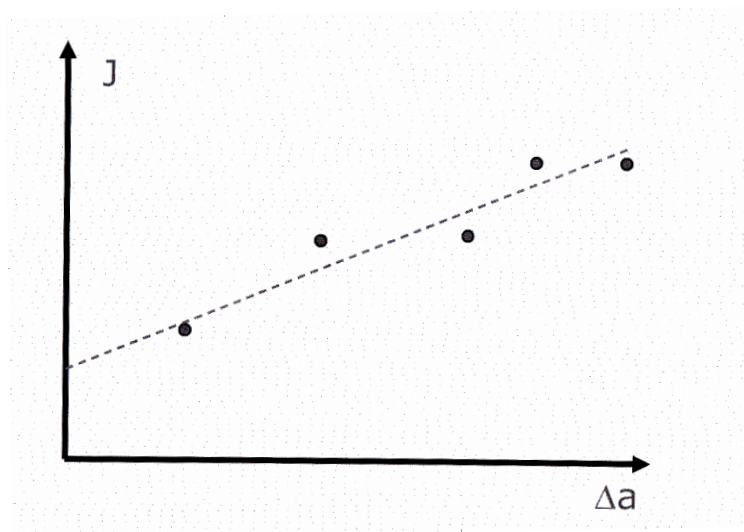


FIGURA 3.4.XVII DETERMINACION DE  $J_{IC}$  CON SOLO UNA PROBETA

Para la determinación de esta parte de la grafica son necesarios como mínimo cuatro puntos. Para la determinación de la  $J_C$  hay que determinar la stretch width zone, que es la zona donde el crecimiento de la fisura no es estable. Se determina midiendo en la probeta después de que la probeta haya roto.

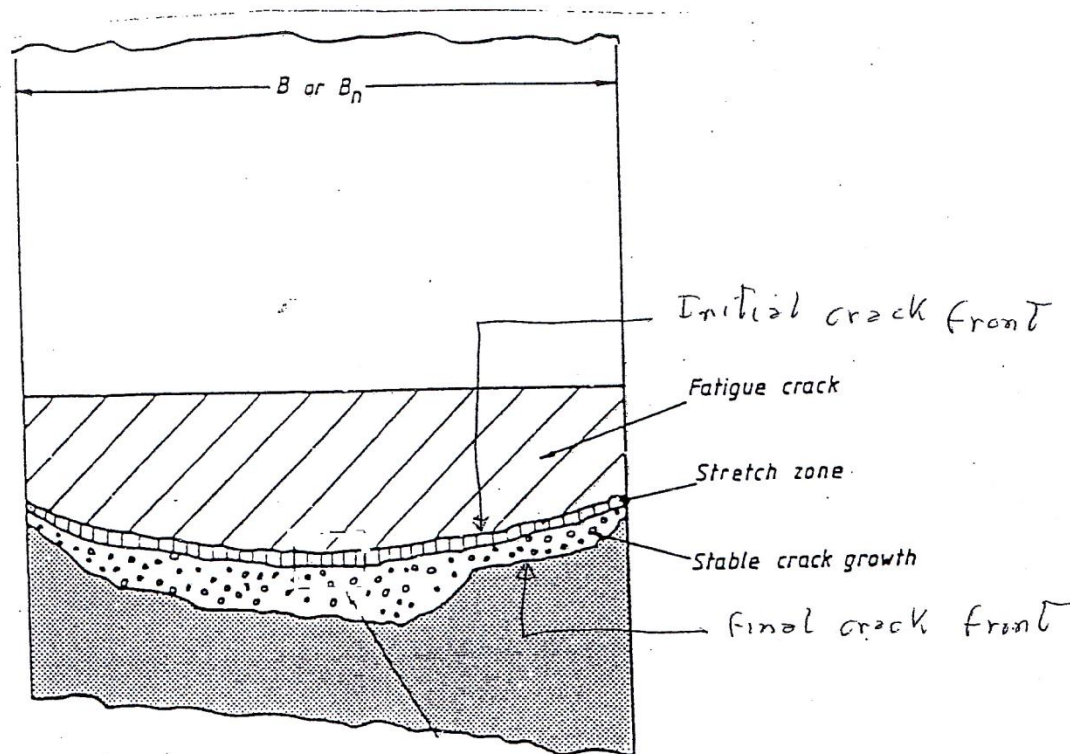
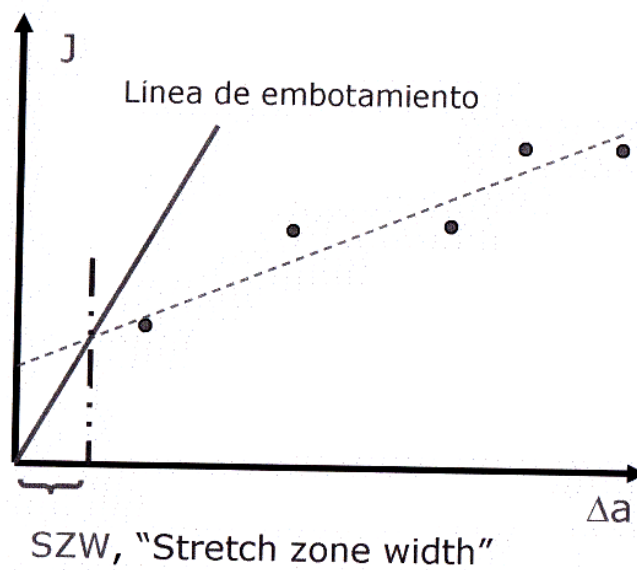
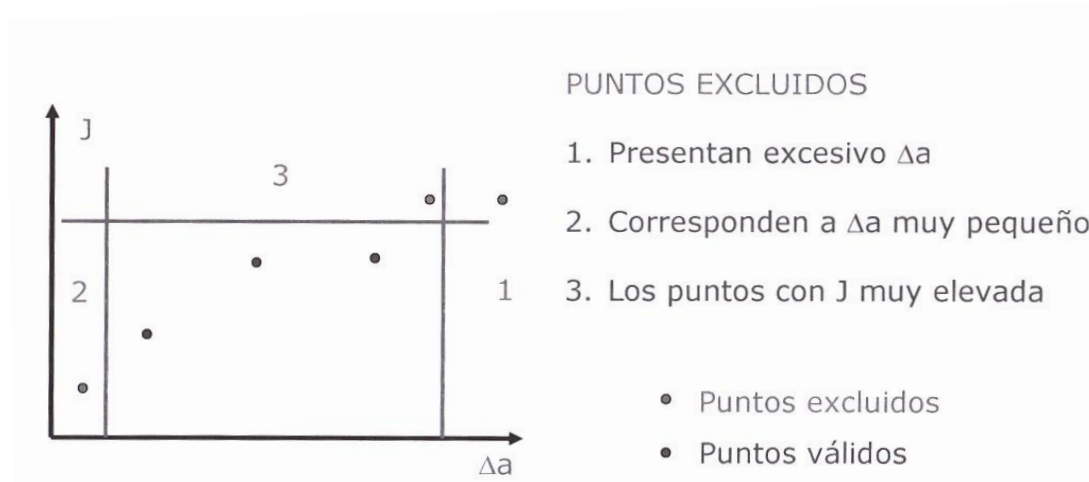


FIGURA 3.4.XVIII DETERMINACION DE STRECH WIDE ZONE

Después se calcula el  $J_C$ , que es donde corte la recta vertical de swz con la función de  $J$ .

FIGURA 3.4.XIX DETERMINACION DE  $J_{IC}$  CON SWZ

Mientras que si es con varias probetas. Se calcula el valor de  $J$  para cada probeta, se tienen que excluir los puntos que no cumplan con el criterio de excesivo  $a$ , que tengan  $a$  muy pequeño o con  $J$  muy elevada.



**FIGURA 3.4.XX DETERMINACION DE  $J_{IC}$  CON MAS DE UNA PROBETA**

### 3.5 MODO II

Este modo es diferente al crecimiento de la fisura por esfuerzo cortante máxima del modo I. Este modo de crecimiento está caracterizado porque la probeta está sometida a esfuerzo cortante. El crecimiento de la fisura es paralelo a dicho esfuerzo cortante. En el modo II puro los labios de las fisuras tienen rozamiento y un crecimiento muy lento, ya que están siempre en contacto. Este crecimiento lento favorece que la fisura gire para crecer en el modo I que es más rápido.

Este modo produce que las caras de la fisura estén siempre en contacto y se cierren. Esto produce que se reduzcan las fuerzas que producen el crecimiento de la fisura, lo que lleva a lo comentado anteriormente de que el crecimiento es muy lento. Si a este modo se le superpone un modo I de compresión, todavía reducirá más la velocidad de crecimiento, mientras que si superpone un modo I de tracción se aumentaría la velocidad de crecimiento.

Los investigadores y la bibliografía consultada es confusa. Hay quien dice que el crecimiento en modo II es más rápido que en modo I, otros que más lento. Estos resultados muestran que depende del material usado por dichos investigadores. El aluminio tiende a crecer en modo II, sin embargo el acero evita dicho crecimiento [11]. En general pequeñas cargas y muchos ciclos de fatiga favorece el Modo I, altas cargas favorecen el modo II. Muchos autores [12] piensan que en la naturaleza salvo en terremotos no se da el crecimiento estable en modo II.

La esfuerzo cortante cerca de una fisura tiene su concentrador de tensiones como  $K_{II} = \tau\sqrt{\pi a}$  llevando al criterio de fractura de  $K_{II} < K_{IIC}$

La forma de conseguir el  $K_{IIC}$  es diversa, en general se analiza la probeta en modo I de tracción y se hacen aproximaciones con correlaciones ya conocidas [13]. Otro método es hacer el experimento con una probeta cuadrada a la que se le somete a tracción en un eje y a compresión en otro (ver FIGURA 3.7.I)

## 3.6 SOLUCIONES PARA MODO MIXTO I Y II

### 3.6.1 INTODUCCION

El modo mixto es la combinación del modo I y el modo II. Ejemplos de estas probetas aparecen en la siguiente figura. [13]



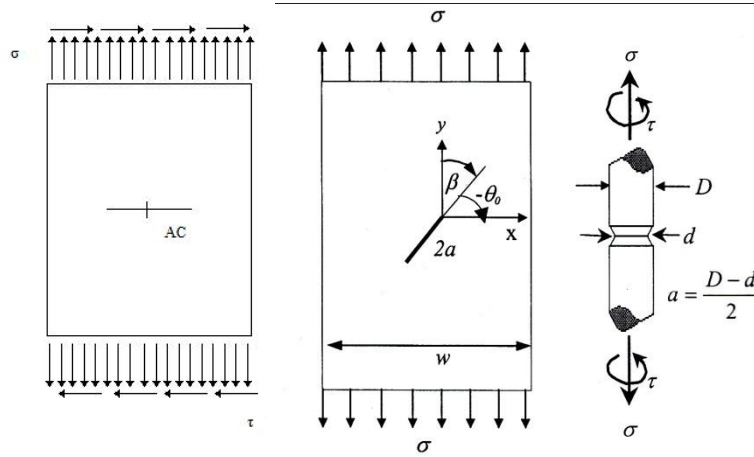


FIGURA 3.6.I- MODO MIXTO EN DIVERSOS CASOS

Este tipo de probeta o estructura, estaría en ejes, en estructuras a tracción con fisuras inclinadas o en probetas con fisuras rectas con tracción y esfuerzo cortante.

Para cualquiera de estos casos, la fisura empezara a crecer en el modo II y luego se orientara de tal forma que la propagación sea de tal forma que el modo predominante sea el modo I, suprimiendo el modo II por muy grande que sean las esfuerzo cortantes. Se muestra en la siguiente figura el modo esquemático y las microfotografías de casos reales.

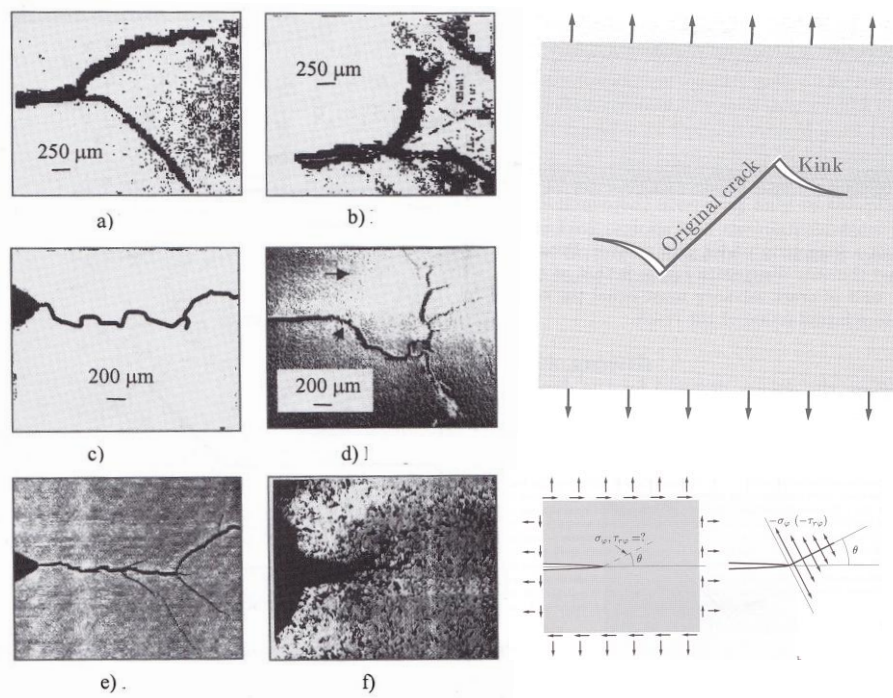


FIGURA 3.6.II. DIVERSAS MICROGOTOGRAFIAS DE FISURAS EN MODO MIXTO Y ESQUEMAS DE GIRO BRUSCO EN FISURA

La propagación de la fractura hija suele ser inestable, llevando la mayoría de la veces a la fractura inesperada

### 3.6.2 SOLUCION DE WO

Este método se basa en la suposición de la interacción de los dos modos. Es la aplicación simultánea de los dos criterios de tenacidad a fractura. Se le llama también el método de la de la elipse. Se suele usar cuando las zonas de plastificación son pequeñas con respecto a la longitud de fisura. El criterio es el siguiente para el caso a de la **FIGURA 3.6.I**

$$\left( \frac{K_I}{K_{IC}} \right)^2 + \left( \frac{K_{II}}{K_{IIC}} \right)^2 = 1$$

Este criterio se puede utilizar para fisura para los casos b y c de la figura. Para el caso b de la figura habría que introducir expresiones trigonométricas para que la solución quede en función de  $\beta$ . Con este criterio, pero más desarrollado, se puede predecir el giro de la fisura hija. Para el caso del eje, caso c de la figura, se sustituiría los parámetros en modo II por el modo III.

Si se representara en ejes cartesianos la anterior expresión, siendo los ejes cartesianos  $K_I$  y  $K_{II}$ , el resultado sería una elipse o un círculo cuando coincidan  $K_{IC}$  y  $K_{IIC}$  (como se muestra en la siguiente figura).

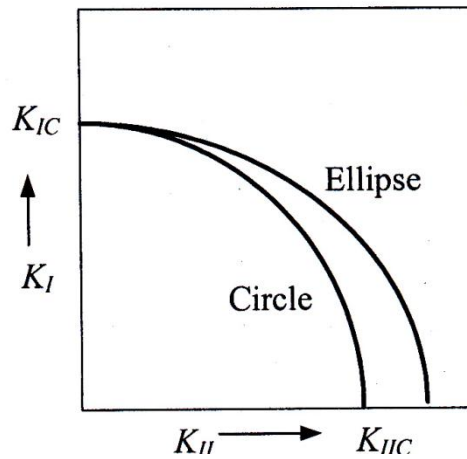


FIGURA 3.6.III GRAFICA DE METODO DE LA ELIPSE

Como existen correlaciones empíricas entre  $K_{IC}$  y  $K_{IIC}$  se puede transformar el anterior criterio, en la siguiente expresión.

$$\lambda K_{IC} := \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2}$$

Despejando de cualquiera de las dos expresiones la longitud crítica de fisura es

$$a_{critica\_Wo\_} := \left[ \frac{K_{IC}^2 \cdot K_{IIC}^2}{(\mu \cdot \sigma_z)^2 \cdot K_{IIC}^2 + \tau^2 \cdot K_{IC}^2} \right] \cdot \frac{1}{\pi}$$

### 3.6.3 SOLUCION DEL GIRO

En la figura se pueden observar los cambios de direcciones bruscos en la orientación, las causas de dichos cambios pueden ser por los siguientes motivos:

- Campo de tensiones multiaxiales
- Interacción de la fractura con defectos internos

- Cambios repentinos en la carga
- Fragilización por un ambiente

El modelo es el siguiente

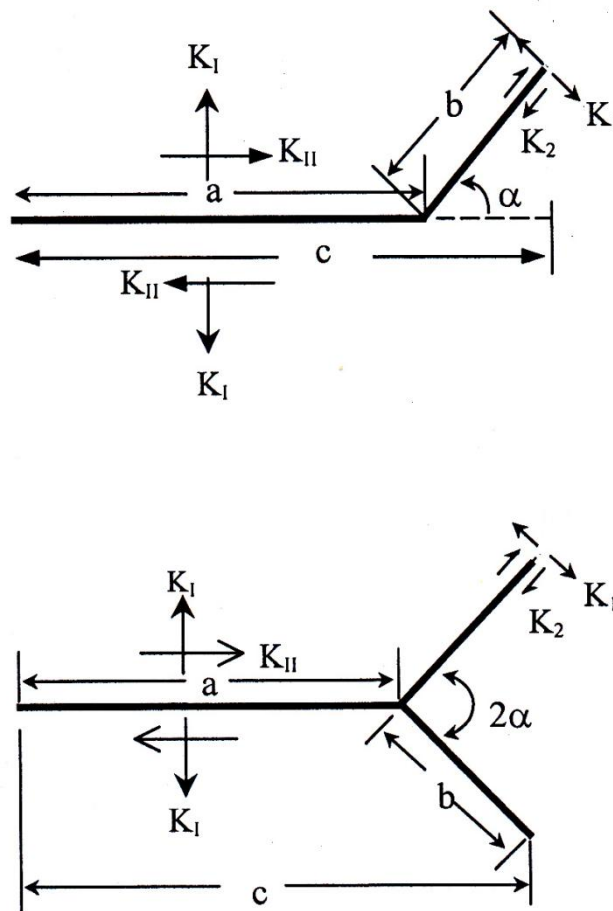


FIGURA 3.6.IV- MODELO DE FISURA HIJAS

Se trata de calcular  $K_I$  y  $K_2$  para las fisuras hijas. Se suponen zonas de plastificación pequeñas. Se definen los  $K_I$  y  $K_2$  de la siguiente forma

$$K_I = a_{11}(\alpha) K_I + a_{12}(\alpha) K_{II}$$

$$K_2 = a_{21}(\alpha) K_I + a_{22}(\alpha) K_{II}$$

Los factores de forma son

$$a_{11}(\alpha) = \frac{1}{4} \left( 3 \cos \frac{\alpha}{2} + \cos \frac{3\alpha}{2} \right)$$

$$a_{12}(\alpha) = \frac{-3}{4} \left( \sin \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{3\alpha}{2} \right)$$

$$a_{21}(\alpha) = \frac{1}{4} \left( \sin \frac{\alpha}{2} + \sin \frac{3\alpha}{2} \right)$$

$$a_{22}(\alpha) = \frac{1}{4} \left( \cos \frac{\alpha}{2} + 3 \cos \frac{3\alpha}{2} \right)$$

Aunque las fisuras hijas sean muy pequeñas, la tasa de liberación de energía varia y queda de la siguiente forma

$$G(\alpha) = \left( \frac{K_1^2}{E} + \frac{K_2^2}{E} \right) (1 - \nu^2)$$

Con lo que el criterio es el siguiente

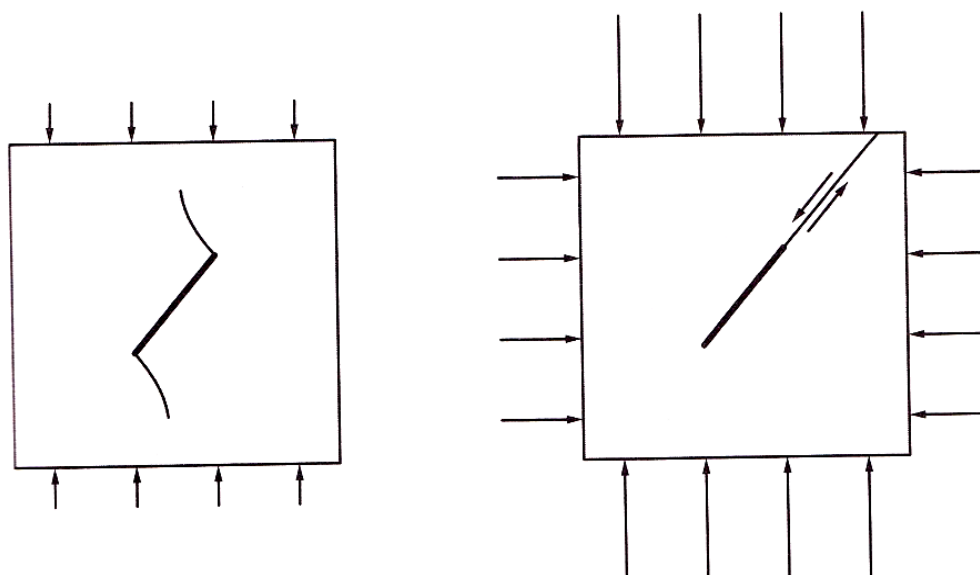
$$G(\alpha) < J = G$$

## 3.7 COMPRESION CON MODO II

### 3.7.1 COMPRESION PURA

Es asumido teóricamente que las grietas no crecen bajo un estado compresivo, sin embrago, la experiencia muestra lo contrario. Si se piensa en las rocas, por ejemplo, las cuales pueden romper por fractura bajo cargas uní axiales compresivas. [\[12\]](#)

Experimentos muy sencillos de laboratorios han demostrado cierto crecimiento de la fisura si dichas fisuras tienen la orientación adecuada bajo cargas uní axiales compresivas. En estos experimentos, el crecimiento ocurre desde los ejes de un fisura pre existente al estado de carga uniaxial debido al rozamiento de los labios de la fisura uno contra otra, luego será por modo II



**FIGURA 3.7.I- ESQUEMA DE PROBETA A COMPRESION**

Como se muestra en la figura ocurrirá un cambio repentino en la orientación de la fisura. Esta segunda orientación será para la propagación en modo I. La dirección de esta fisura hija será curvada acabando en la dirección de la compresión, ocurriendo que una vez el crecimiento una vez orientada en la dirección de la compresión, la fisura crecerá muy lentamente, llegando algunas veces a parar dicho crecimiento. El crecimiento de la fisura hija suele ser comparable a la primera fisura o fisura madre. Es de destacar que el ángulo de la fisura hija es distinto del modo mixto, en dicho modo la dirección es perpendicular a la tensión remota.

Un experimento similar se ha desarrollado con la adición de una presión lateral en la probeta para suprimir el crecimiento en modo I. Se coloca la grieta madre de tal forma que el modo II sería su crecimiento recto. Este ángulo depende sobre todo del factor de rozamiento de las caras. Para conseguir este tipo de crecimiento se necesita

que la compresión en el eje vertical sea muy superior al del eje lateral, de hecho debe ser de unas 20 veces mayor. Dicho crecimiento será inestable. Imagen derecha

### 3.7.2 SOLUCION DE YOFFE

Para el estudio de otras soluciones las zonas de plastificación de la punta de la fisura es pequeña y los labios de la fisura no tienen rozamiento entre ellas. Para la aplicación de dicha solución se tendrá en cuenta que existe rozamiento y la zona de plastificación es grande. Como muestra la figura

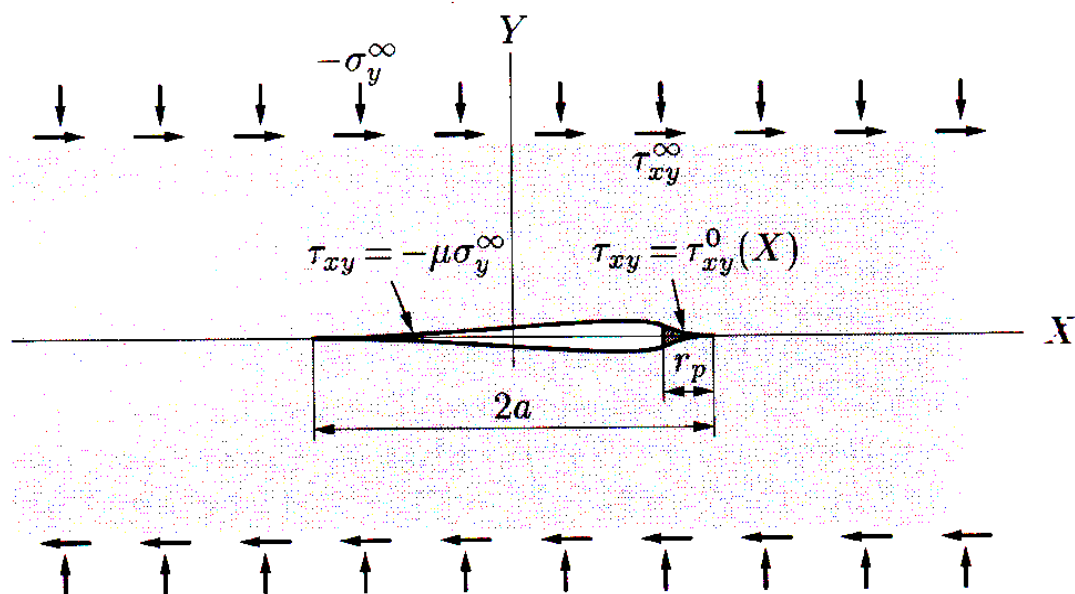


FIGURA 3.7.II ESQUEMA TEORIA YOFFE

La solución será la esfuerzo cortante mas la superposición de la solución del rozamiento. El rozamiento seguirá la formula de Coulomb, donde se multiplica la tensión por el coeficiente de rozamiento.

El factor de intensidad de tensiones queda de la siguiente forma.  $K_{II} := 2(\tau - \mu \cdot \sigma) \cdot \sqrt{\pi a_c}$

El criterio de queda de la siguiente forma  $K_{II} < K_{IIC}$



La expresión para la longitud crítica es:

$$a_{\text{yoffe}} := \left[ \frac{K_{\text{IIC}}}{2(\tau + \mu \cdot \sigma_z)} \right]^2 \cdot \frac{1}{\pi}$$

## **4. LA RUEDA FERROVIARIA**



## 4.1 INTRODUCCION

### 4.1.1 BOGIE

Un vehículo ferroviario consiste en una estructura y un chasis provisto de distintos equipos. Estos equipos están compuesto por: órganos de rodadura, caja de grasa, suspensión, órganos de tracción y choque, caja, frenos y accesorios [14]. A este chasis se le denomina *bogie*.

La palabra *bogie* es un término inglés que sirve para designar al carro o eje al que se fijan las ruedas de un vehículo ferroviario, que soportan un vagón, el extremo de arrastre de una locomotora o un extremo de un vehículo y que puede pivotar bajo él.

Un bogie se compone generalmente de dos ejes montados sobre un bastidor, que incorpora una suspensión propia llamada suspensión secundaria. También existe una suspensión colocada entre él y el bastidor que es la denominada primaria. La caja del vehículo queda unida al bastidor mediante el pivote.

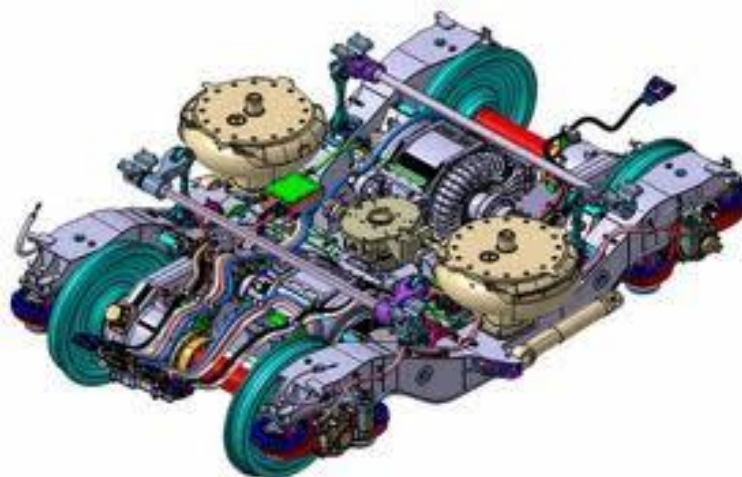


FIGURA 4.1.I –BOGIE-

### 4.1.2 EJE MONTADO

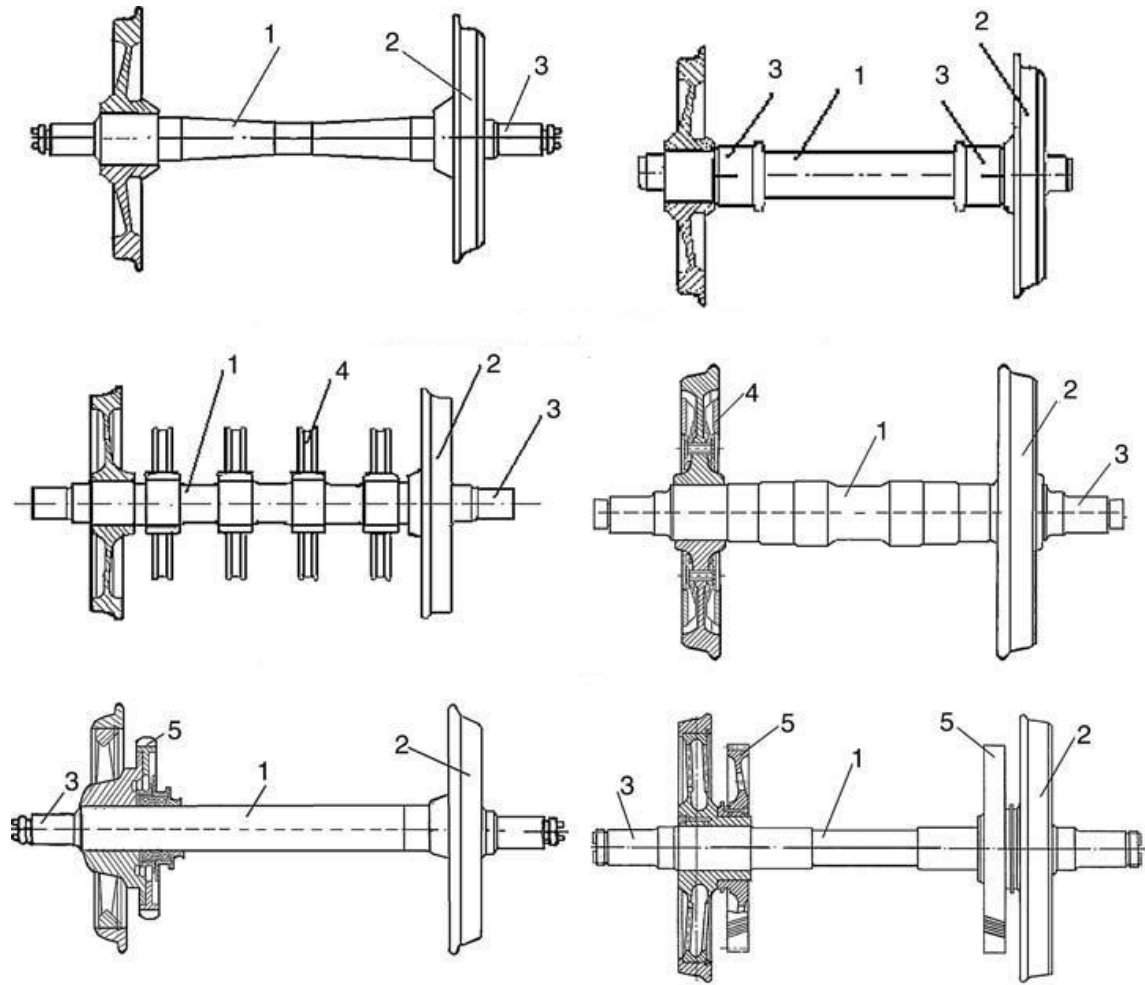
El eje montado son dos ruedas montadas rígidamente a un eje. El eje montado esta soportado por rodamientos en las cajas de grasa. [15]

Las funciones del eje montado son:

- Mantiene las distancias necesarias entre la vía y el vehículo
- Guía al vehículo por el carril, tanto en curva como en recta
- Transmite las fuerzas de tracción al carril

Los tipos del eje montado dependen de

- Del tipo de vehículo (motor o remolque)
- El tipo de frenado: zapata, disco en la rueda, disco en el eje, disco en la rueda
- Posición de los rodamientos y las cajas de grasa



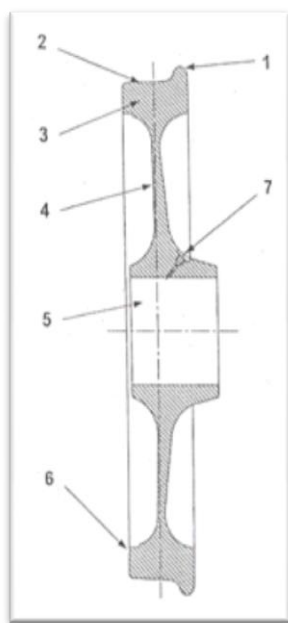
1. Eje; 2. Rueda; 3. Rodamiento; 4; Freno de disco; 5 Reductora

**FIGURA 4.1.II –EJES MONTADOS**

## 4.2 LA RUEDA

### 4.2.1 PARTES DE LA RUEDA

Una vez se ha visto donde se sitúa la rueda dentro del ferrocarril, se muestra en la figura las partes fundamentales de las que consta. [14]



1.- PESTAÑA

2.- BANDA RODADURA

3.- LLANTA

4.- VELO

5.- CUBO

6.- LIMITE MAXIMO DESGASTE

7.- ALOJAMIENTO DECALADO

FIG. 4.2.I- LA RUEDA

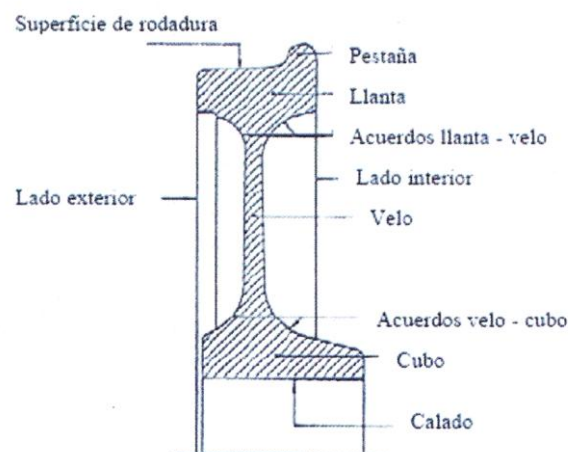
- **Pestaña:** aro saliente en el borde de la llanta de un vehículo ferroviario, destinado a impedir el descarrilamiento.
- **Banda rodadura:** Superficie de contacto entre llanta y el carril.
- **Llanta:** Corona circular metálica que, calada sobre el núcleo constituye la superficie de rodadura de la rueda sobre el carril.
- **Velo:** Corona circular metálica que une la llanta al cubo de la rueda.

- **Cubo:** Elemento mecánico que establece la unión de la rueda y el eje.
- **Límite máximo de desgaste:** Es el límite hasta el cual se puede reperfilear una rueda en condiciones de seguridad.
- **Alojamiento decalado:** es el dispositivo mediante el cual se introduce aceite a presión para el calado de la rueda y el eje.

#### 4.2.2 TIPOS DE RUEDA

En función de como se une la llanta al velo, se pueden encontrar tres tipos fundamentales de ruedas. [16]

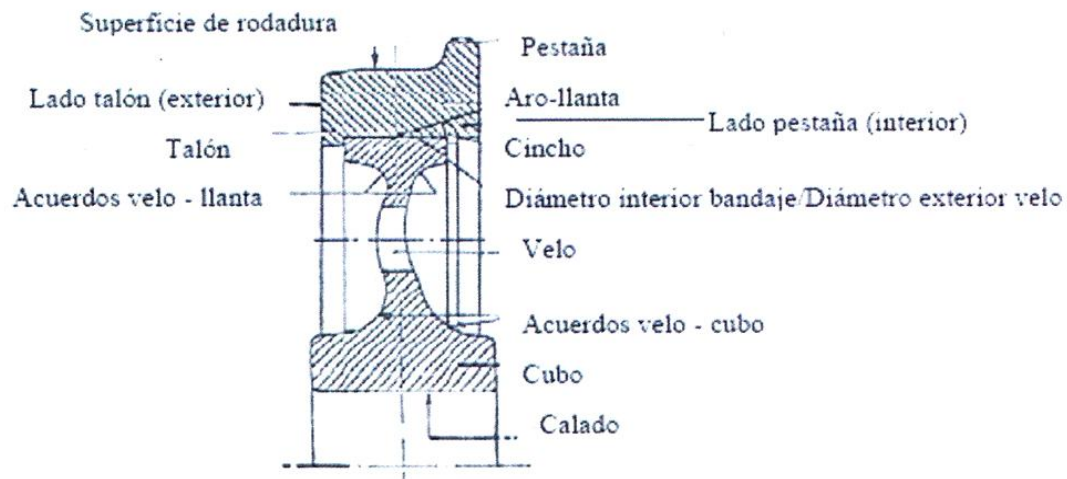
**RUEDA MONOBLOQUE:** La llanta y el velo se unen a través de un radio de acuerdo, perteneciendo la llanta y el velo a la misma unidad.



**FIGURA 4.2.II RUEDA MONOBLOQUE**

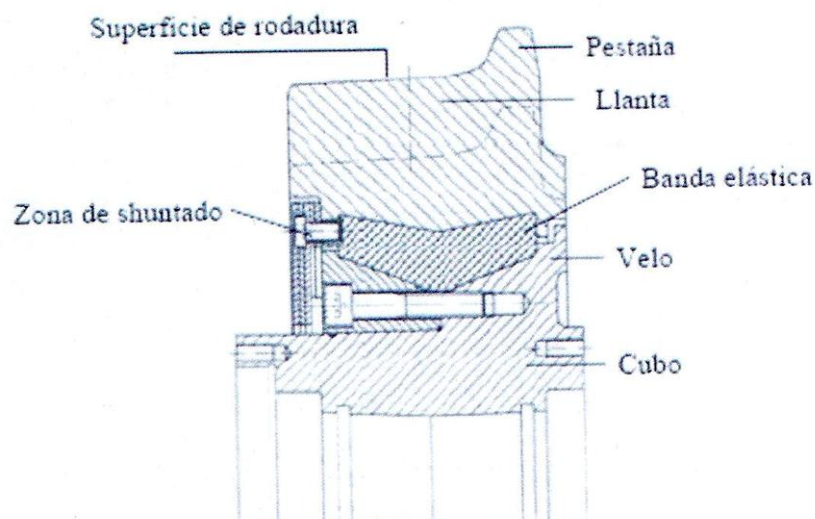


**CENTRO Y BANDAJE:** La llanta se une al velo a través de un aro metálico denominado Cincillo, con calado en caliente. En este caso es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo.



**FIGURA 4.2.III- RUEDA BIBLOQUE**

**RUEDA ELASTICA:** La llanta se une al velo a través de una banda de goma. En este caso también es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo. La banda elástica amortigua ruidos y vibraciones y es muy usada en las ruedas de los tranvías y metros ligeros.



**FIGURA 4.2.IV.- RUEDA CON BANDA ELASTICA**

### 4.2.3 PARAMETROS A CONTROLAR

A continuación, se enumeran los parámetros que se deben tener controlados en las ruedas ferroviarias en cuanto a medidas, ya que si alguno de ellos se saliese fuera de los límites establecidos, sería motivo de reperfilado o sustitución, dependiendo de lo que proceda en cada caso. [17]

#### ESPESOR DE PESTAÑA ( $S_d$ )

El espesor de pestaña, es la distancia horizontal existente entre la cara interior de la rueda y el punto de intersección con el contorno de la pestaña, situado a 10 mm por encima del diámetro de rodadura

#### ALTURA DE PESTAÑA ( $Sh$ )

La altura de pestaña, es la distancia vertical entre el diámetro de rodadura ( $D$ ), y una línea tangente al punto superior de la pestaña

#### COTA “qR”

El termino cota “qR” se emplea para definir la distancia horizontal existente entre dos puntos que interfieren con la pestaña, el primer punto es el punto (A), situado a 10 mm por encima del diámetro de rodadura ( $D$ ), y el segundo punto (B) situado a 2 mm por debajo de una línea tangente a la cara superior de la pestaña

Los tres parámetros descritos con anterioridad, espesor, altura de pestaña y cota  $qR$ , se determinan por medio de un calibre universal que es capaz de medir simultáneamente de los tres parámetros.

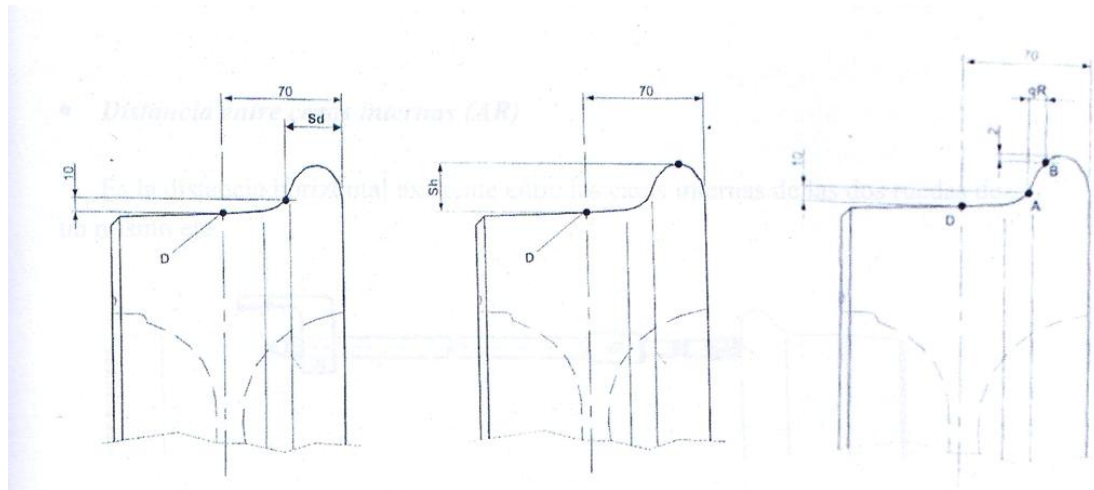


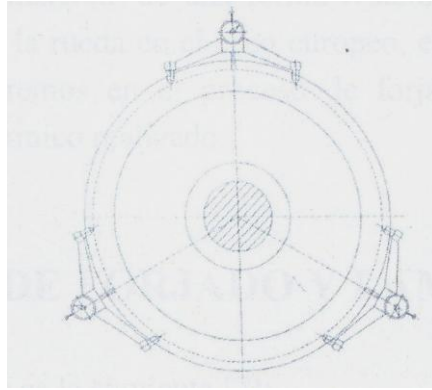
FIGURA 4.2.V.- PARAMETROS A CONTROLAR

## DIAMETRO DE RODADURA

El diámetro de rodadura, es la distancia existente entre dos puntos diametralmente opuestos, que interseccionan con la banda de rodadura y que están situados en un plano paralelo a la cara interior de la rueda, a una distancia de 70mm desde ella

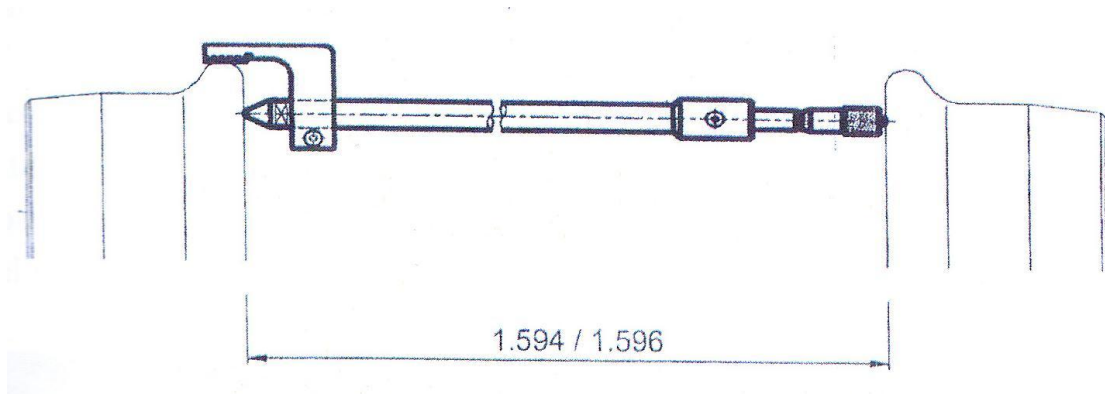
## OVALAMIENTO (RA)

El valor del ovalamiento queda determinado por la diferencia existente entre el diámetro mayor y menor, extraídos de la medición del diámetro de rodadura de una misma rueda en tres puntos distintos distantes entre si  $120^\circ$

**FIGURA 4.2.VI- OVALAMIENTO**

- DISTANCIA ENTRE CARAS INTERNAS (AR)

Es la distancia horizontal existente entre las caras internas de las dos ruedas de un mismo eje

**FIGURA 4.2.VII- DISTANCIAS ENTRE CARAS**

- DIFERENCIA DE DIAMETRO ENTRE RUEDAS DE UN MISMO EJE
- DIFERENCIA DE DIAMETRO ENTRE RUEDAS DEL MISMO BOGIE
- DIFERENCIA DE DIAMETRO EN RUEDAS MOTRICES DE UN MISMO COCHE

## 4.3 TIPOS DE ESFUERZOS QUE SOPORTAN LAS RUEDAS

Para comprender porque surgen las fisuras en las ruedas, es fundamental conocer las sollicitaciones a las que están sometidas. Estas sollicitaciones son debidas a las cargas verticales por eje y a las fuerzas de guiado del vehículo, además sobre la banda de rodadura de las ruedas motrices o sobre aquellas en las que actúan los frenos, se añaden fuerzas por deslizamientos entre ruedas y carril y cargas térmicas.

Los esfuerzos a los que están sometido una rueda pueden clasificarse e varias formas, en este caso nos centraremos en las dos formas más ampliamente utilizadas: espacio de tiempo transcurridos desde que se manifiestan y origen de las mismas [\[18\]](#).

Desde el punto de vista del tiempo transcurrido podemos clasificarlos en:

- **ESFUERZOS CONSTANTES O DE VARIACION LENTA EN EL TIEMPO:** las producidas por el peso del coche, en este grupo se incluyen las tensiones residuales de fabricaron, las tensiones de calado y las tensiones permanentes desarrolladas tras una frenada de larga duración
- **ESFUERZOS QUE SE MANIFIESTAN DE FORMA INTERMITENTE:** en este grupo se incluyen las debidas a gradientes térmicas
- **ESFUERZOS CICLICOS:** Se manifiestan en las zona elasto-plástica de contacto entre rueda y carril son las tensiones ligadas a la rotación. Se deben a la carga, al esfuerzo de tracción y al pseudo-deslizamiento. Aunque las cargas no sean muy elevadas, se pueden producir en la zona de contacto rueda-carril deformaciones plásticas en la llanta. Durante los primeros ciclos de carga se introducen en la rueda tensiones residuales, que junto a las deformaciones existentes, producen un endurecimiento del material.

Desde el punto de vista de su origen se clasifican en:

- **ESFUERZOS TERMICOS:** Las frenadas y los esfuerzos motores producen patinaje debido a la perdida de adherencia entre la rueda y el carril, provocando la aparición de dichos esfuerzos, que afectan sobre todo a la zona de banda de rodadura, pudiendo llegar a producir transformaciones metalúrgicas en el acero, templado de las zonas que han patinado. Fuertes frenadas pueden crear tensiones que exceden en ciertas zonas el limite elástico del material, provocando modificaciones en el campo de tensiones residuales, favoreciendo de esta manera la evolución de grietas en zonas profundas
- **ESFUERZOS MECANICOS:** La existencia de un esfuerzo verticales aplicados sobre la banda de rodadura en el contacto rodante y un esfuerzo lateral sobre la pestaña debidos a la carga por rueda y al guiado sobre la vía, provocan la aparición de esfuerzos mecánicos.

Los esfuerzos depende del diseño del bogie, de su diámetro y tipo de ruedas; carga por eje, valor de la masa no suspendida, suspensión y de los sistemas de guiado y frenado. También dependen de las condiciones de utilización, como puede ser la velocidad, carga y tipo de trenes, y de las condiciones de acoplamiento entre la rueda y el carril, como pueden ser sus perfiles. Además, los esfuerzos también dependen de defectos existentes en las ruedas, como defectos de fabricación, ovalización, diferencia de diámetros entre ruedas de un mismo eje, etc...

## 4.4 DAÑO EN RUEDA

### 4.4.1 INTRODUCCION A TIPOS DE DAÑO DE RUEDA

Las fisuras en las ruedas son importantes por tres razones. Una es la seguridad debido al peligro de rotura de la rueda o al peligro de que parte de las pestaña o de la banda de rodadura se desprenda. Otra es el confort, ya que las fisuras pueden llegar a desarrollar cavidades que producen altas vibraciones y empeoran el confort de los viajeros. La última es el consumo de la llanta, ya que para eliminar las fisuras se debe mecanizar la rueda [\[14\]](#).

Las fisuras pueden producirse por muchas razones, siendo muy difícil en ocasiones delimitar los verdaderos motivos de su inicio, no se entienden completamente todas las causas que las producen o en ciertas circunstancias surgen un tipo de fisuras hasta entonces desconocidas.

Las fisuras nacen a partir de defectos. Los defectos pueden ser de dos tipos:

- Defectos producidos durante la fabricación.
- Defectos producidos durante el servicio y sujetos a observación en los talleres de mantenimiento.

Cuando se ha iniciado una fisura, bien debido a un proceso de fatiga o por una imperfección en el material original, es importante conocer bajo que condiciones la fisura crecerá. Las fisuras crecen básicamente debido a la acción de los esfuerzos mecánicos, mientras que los esfuerzos térmicos juegan a un papel importante en la nucleación de las mismas.

La formación de fisuras y su propagación se debe principalmente a las tensiones de cortadura. En una rueda sujeta a contacto de rodadura pura, la tensión de cortadura mayor se da entre los 3 y 5mm por debajo de la superficie [18]. Si además se aplica una fuerza de fricción, como es la del frenado, esta aumentara la tensión de cortadura en la superficie, dando lugar a dos zonas con una alta tensión de cortadura en la superficie.

Es importante detectar las ruedas en las que se haya iniciado una fisura antes que ocurra una fractura rápida, sin embargo esto se hace especialmente crítico en zonas de climas fríos, la resistencia a la fractura de los aceros en estas condiciones es menor.

Otro aspecto que merece la pena destacar, es que las ruedas que son más propicias la aparición de fisuras son aquellas que han sufrido un sobrecalentamiento como consecuencia de una frenada prolongada, debido a que las fuerzas de compresión residuales conseguidas tras el tratamiento térmico durante su fabricación se transforman en tensiones de tracción, que ayudan a la iniciación y propagación de las fisuras.

A continuación se describen los principales defectos detectados en la ruedas ferroviarias según la zona de la rueda en los que se producen, así tendremos defectos en la zona de la pestaña, defectos en la banda de rodadura, defectos en el velo y defectos en el cubo.

Es importante tener presente, si bien generalmente un modo de fallo es el preponderante en la rueda, no tiene porque ser el único motivo por el que se haya producido un fallo, sino que se puede dar una combinación de varios motivos.

#### **4.4.2 DEFECTOS EN LA ZONA DE LA PESTAÑA**

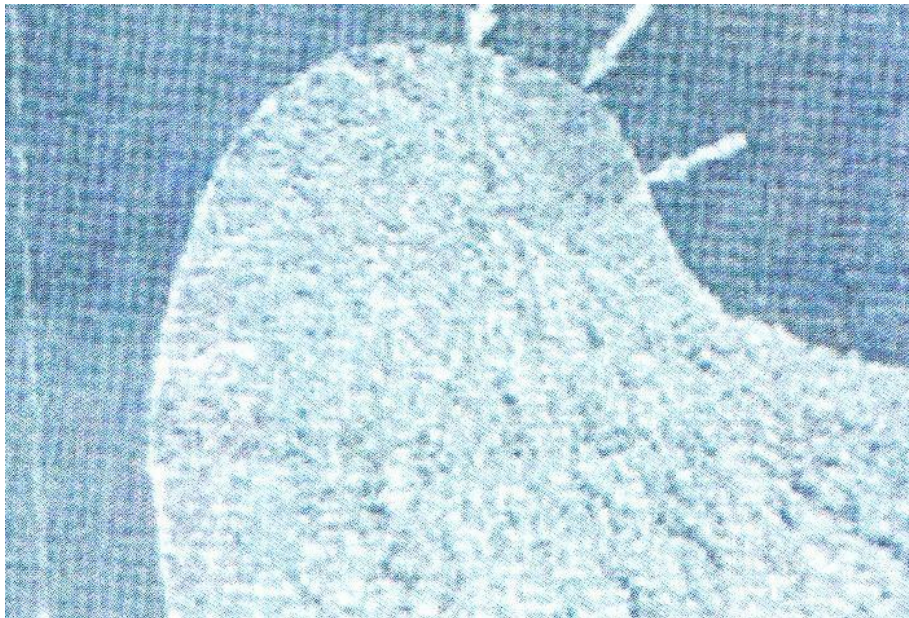
Se producen fisuras de progresión axial que pueden afectar a una o varias zonas de la pestaña. Este tipo de fisuras pueden tener origen térmico o mecánico. En el caso de



que sean de origen térmico se suelen deber a una fricción severa de la zapata de freno sobre la pestaña, por el uso de zapatas de geometría inadecuada. En el caso de fisuras de origen mecánico, las grietas se producen por tensiones anormales entre pestañas y carril debidas a trazados de vía deficientes con curvas abundantes y/o excesivamente cerradas.

Estas fisuras pueden verse en los trenes de mercancías, si bien no son muy comunes, esencialmente en Europa.

Una pequeña fisura originada por fatiga, iniciada en el interior de la pestaña de hasta 23 descarrilamientos en el año 1996 en los trenes de mercancías de Estados Unidos.



**FIGURA 4.4.I-FISURA EN PESTAÑA**

### 4.4.3 DEFECTOS EN LA ZONA DE LA BANDA DE RODADURA

#### 4.4.3.1 DESGASTE POR RODADURA

La evolución de los perfiles tanto de las ruedas como del carril influye fuertemente en la dinámica del vehículo. Al aumentar el desgaste en las ruedas se incrementa la conicidad equivalente en la unión rueda-ferrocarril, llevando a una disminución en la estabilidad del vehículo a alta velocidad, junto con un efecto negativo en el comportamiento en curva. El deslizamiento entre la rueda y el carril es una de las principales razones para el desarrollo del desgaste y de las fisuras superficiales. Al ir aumentando la velocidad en los trenes, la superficie de las ruedas está sujeta a mayores desgastes y tensiones. [\[14\]](#)

El desgaste regular se produce por la lenta variación de los valores de fuerza de contacto y el deslizamiento, asociado al movimiento longitudinal y lateral del eje de la vía. Desde el punto de vista de la seguridad se deben restringir los parámetros de espesor y ángulo de la pestaña ( $q_R$ ), cuyo mínimo se limita para evitar descarrilamientos.

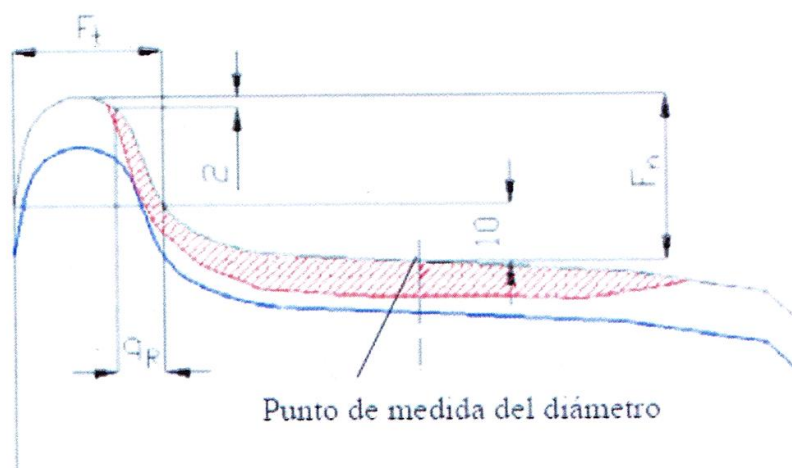
El desgaste inicialmente es uniforme en toda la banda de rodadura, siendo después más acusado en dos zonas, cerca de la pestaña y en el extremo opuesta a la misma. Este desgaste es principalmente debido a las fuerzas de arrastre que actúan en la banda de rodadura cuando la rueda opuesta está con la pestaña haciendo contacto en el carril.

Lógicamente el desgaste de rueda y carril depende de las durezas de sus materiales, sin embargo, generalmente el desgaste en la banda de rodadura es bastante lento, alrededor de 1,5 a 3mm de media cada 100000Km. [\[21\]](#)

Las ruedas se tornean a lo largo de su vida útil una serie de veces cuyo motivo principalmente es el desgaste y la eliminación de fisuras superficiales. De esta manera el

diámetro de la rueda se reduce y debido a esto las tensiones de contacto aumentan considerablemente afectando negativamente a la vida de las ruedas en el servicio. Otro probablemente asociado a esta disminución de diámetro viene dado porque fisuras que se podían encontrar en el interior de la rueda y que por su posición no estaban afectadas por las máximas tensiones, al ir reduciendo el diámetro pueden ir quedando cada vez mas cerca de la superficie y de esta forma fisuras que anteriormente no eran peligrosas, ahora si debemos tenerlas en cuenta.

En la figura se indican los puntos que se deben medir en una rueda ferroviaria referente al desgaste, estos puntos ya se definieron anteriormente.



**FIGURA 4.4.II –DESGASTE EN BANDA RODADURA**

En los últimos años la optimización en la lubricación y el uso de aceros de mayor resistencia, si como la mejora en las técnicas antideslizamiento y mejor contacto rueda-carril, ha traído consigo la disminución del desgaste por rodadura

Actualmente el peso máximo permitido por eje en Europa es de 25000Kg sin embargo se está contemplando la posibilidad de aumentar esta cifra hasta 30000Kg para aumentar la capacidad de los trenes, sobre todo en los de mercancías. Este incremento en la carga puede traer consecuencias graves, ya que se puede producir un rápido desgaste de los carriles al no estar diseñados para estas cargas lo que directamente puede influir en el contacto rueda-carril y por tanto ocasionar un riesgo de accidente.

Una vez se ha comentado el desgaste, se enumeran los tipos de fisuras que se pueden desarrollar en función de la profundidad a la que se encuentre sobre la banda de rodadura, así se distingue entre nivel superficial, nivel subsuperficial y nivel interno.

#### **4.4.3.2. FISURAS A NIVEL SUPERFICIAL “SPALLING”**

Las fisuras superficiales, denominadas “spalling”, son grietas formadas en la superficie de rodadura por diversas causas y que se propagan hacia el interior de la llanta, llegando a producir desprendimiento de material.

Las fisuras superficiales pueden ser causadas principalmente por el deslizamiento de las ruedas o por la acumulación de deformación plástica en la superficie de la banda de rodadura, a continuación se comenta cada una de ellas.

##### **4.4.3.2.1. FISURAS SUPERFICIALES PRODUCIDAS POR DESLIZAMIENTO DE RUEDAS**

El deslizamiento de las ruedas puede llegar a producir en la superficie de la rueda un plano. Entre las razones para que se produzca el deslizamiento de las ruedas podemos encontrar desde frenos defectuosos o fuerzas de frenado demasiado altas hasta contaminaciones del carril por hojarasca, lubricantes, hielo, arena, etc.

La fricción entre rueda y carril introduce una alta carga térmica local en la banda de rodadura, llegando hasta temperatura próximas a los 800° C a esta temperatura disminuye el límite elástico en esta zona, pudiendo aparecer deformación plástica. Cuando la rueda vuelva a girar se produce un rápido enfriamiento, produciéndose una transformación de fase en la banda de rodadura, formándose martensita

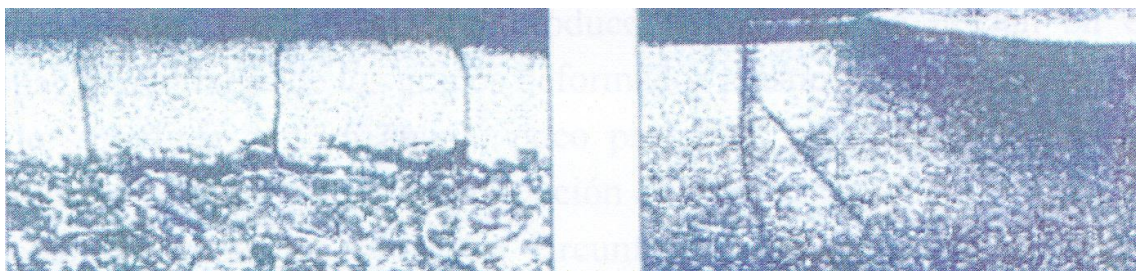
Tras el enfriamiento y la contracción, debe mantenerse la continuidad entre material localmente plastificado y la banda de rodadura con las restricciones permanentes de las ruedas, por lo que la banda de rodadura queda tensionada.

La martensita es frágil, con una estructura cristalina que tiene un coeficiente de expansión volumétrico de un 0.5% comparado con la estructura perlítica a temperatura ambiente. Esto conlleva a que se produzca tensiones residuales compresivas en la estructura martensítica y tensiones residuales de tracción en el material de alrededor. Si la zona afectada térmicamente no se elimina por mecanizado, se formarán fisuras de fatiga por la acción de las tensiones de contacto de rodadura. Mientras la rueda se mueva, la capa de martensita impacta contra el carril favoreciendo el crecimiento de las fisuras.

Una vez que las fisuras crecen, se empieza a producir desprendimiento de pequeños trozos de material, haciendo que de nuevo aumente el nivel de impacto. Las cavidades producidas son del orden de entre 1 y 5mm de profundidad, rodeadas de fisuras con profundidades de hasta 10 y 18mm bajo la banda de rodadura. [22]

Este tipo de defecto se está intentado solucionar desde dos frentes, por un lado mejorando los sistemas de protección anti-patinaje y por otro mejorando las características de dureza y resistencia de los aceros.

En la figura se observa la zona afectada térmicamente y el desarrollo de fisuras en dichas zonas.



**FIGURA 4.4.III. ZONA AFECTADA TÉRMICAMENTE Y DESARROLLO DE GRIETAS**



En la figura se observa una rueda con un gran plano



**FIGURA 4.4.IV RUEDA CON PLANO**

#### **4.4.3.2.2. FISURAS SUPERFICIALES PRODUCIDAS POR DEFORMACION PLASTICA EN LA SUPERFICIE DE LA BANDA DE RODADURA “RACHETTING”**

En este caso, el fallo ocurre cuando la carga está por encima del límite elástico de la rueda, que produce flujo plástico, formándose tensiones residuales y endureciéndose el material por deformación. Si la carga se encuentra por encima de un

valor crítico límite, el límite plástico se acumulara a la deformación plástica en cada carga. El fallo ocurre por ciclo de fatiga de baja frecuencia.

Se trata de un fenómeno de rotura que ocurre cerca de la superficie de rodadura y su principal causa son altas fuerzas de fricción, estas llevan a unas altas tensiones de cortadura seguidas de una alta deformación plástica en la superficie. Cuando la ductilidad de la superficie del material está agotada se desarrolla una fisura.

Estas fisuras suelen orientarse perpendicularmente a la dirección de deslizamiento. La deformación produce fisuras que se inician en el material y se propagan a lo largo de granos deformados plásticamente, propagándose inicialmente en la superficie con un ángulo poco profundo, para seguir una dirección axial, por la cual las grietas se propagan circunferencialmente suele ser entre 1.5 y 2mm, produciéndose la rotura final cuando una parte de la fisura llega a la superficie, desprendiéndose una parte de la banda de rodadura. [23]



FIGURA 4.4.V. RUEDA CON DEFECTO EN BANDA RODADURA

#### 4.4.4.3 FISURAS A NIVEL SUBSUPERFICIAL. EXFOLIACIONES “SHELLING”

La rotura de la banda de rodadura por fatiga, producida por el defecto conocido como “shelling”, es uno de los defectos de ruedas más comunes. Este defecto está

asociado a altas cargas y bajos niveles de deslizamiento, produciéndose la pérdida de material causada por la fatiga de contacto por rodadura. Durante el ciclo de contacto el daño sub-superficial se acumula dando lugar a pequeñas fisuras horizontales. Estas fisuras se propagan bajo la superficie hasta que el campo de tensiones hace que esta cambie de dirección hacia la superficie.

El “shelling” se caracteriza por tener forma de anillo, predominantemente paralelo a la superficie de rodadura. Según los autores que consultemos, la profundidad a la que se produce este tipo de defectos varía. Según algunos [24] ocurre entre 4 y 5mm y según otros entre 6mm [25]. También existen otros autores que aumentan la profundidad hasta los 10mm, lo que si que se sabe, es que por debajo de este límite la resistencia a la fatiga se encuentra totalmente gobernada por la presencia de inclusiones microscópicas. Una vez que se ha iniciado la fisura, esta se propaga hasta una profundidad de unos 2mm, desviándose a esta profundidad a una dirección circunferencial, observándose grietas de entre 15 y 300mm antes de la rotura del material.

Los principales puntos de nucleación de fisuras son los bordes de la interfase ferrita-perlita y las inclusiones no metálicas.

El proceso depende del material y de las condiciones de operación, pero en todos los casos se manifiesta por la iniciación y propagación de las fisuras en capas próximas a la superficie hasta formar desprendimientos que dan lugar a agujeros. Una vez que las fisuras se han formado, se propagan rápidamente paralelas a la superficie hasta la profundidad de mayor tensión de cortadura.

Este tipo de defecto puede ser muy peligroso ya que al crecer las fisuras circunferencialmente, pueden llegar a desprender grandes secciones de material, lo que podría ocasionar un descarrilamiento.

Los factores que provocan la formación de “shelling” son variados, entre ellos encontramos una mala condición del carril, cargas y velocidades excesivas, dureza de la



rueda insuficiente, ruedas demasiado pequeñas para la carga a sostener. Todos estos factores incrementan las tensiones de contacto.

#### **4.4.3.4. FISURAS A NIVEL INTERNO POR INCLUSIONES PROFUNDAS “shattering”**

Este modo de fallo acarrea la pérdida de material en la llanta y en la pestaña, normalmente provocado por inclusiones internas situadas en zonas de contacto sometidas a altas tensiones.

En la práctica ningún material está libre de defectos y sus efectos dependen de su tamaño, forma y orientación. Las fisuras “shattering” se inician por inclusiones de óxido de aluminio en las ruedas forjadas o en huecos o porosidades en el caso de las ruedas fundidas, típicamente americanas. Las inclusiones de alúmina pueden tener varios orígenes: productos de desoxidación que no desaparecen durante el fundido, reoxidación durante el vertido del lingote o trozos de material cerámico del horno o de los cucharones refractarios.

La pureza de los aceros usados en el ferrocarril ha sido una de las mejores destacables en lo que concierne a los proveedores de ruedas, especialmente con el incremento de velocidades en Europa. Se han incorporado medidas de pureza así como muchos métodos de Ensayos No Destructivos, END, para evitar ruedas con defectos en servicio. La medida de pureza, así como los END se realizan después del tratamiento térmico y del mecanizado de las ruedas.

La profundidad del inicio del defecto bajo la superficie de rodadura depende de las características del material, sin embargo la mayoría de autores defienden que se encuentra entre los 10 y 20mm. Estos defectos se propagan normalmente paralelos a la banda de rodadura hacia el exterior de la misa, antes de propagarse hacia el interior de la rueda. Una vez la fisura se ha iniciado, la propagación es rápida bajo las condiciones

normales de carga de la rueda. Sin embargo para que se inicie la fisura es necesario que se produzca una gran carga, como un impacto.

La superficie de fractura tiene típicamente forma de concha, en cuyo centro se encuentra el punto de iniciación de la fisura, ya puede ser por un poro en el caso de las ruedas coladas o una inclusión no metálica en el caso de las forjadas. El fallo final debido a desprendimiento de material, se puede producir hasta con longitudes de fisura de 250mm.

La figura muestra una típica fisura de “shattering”

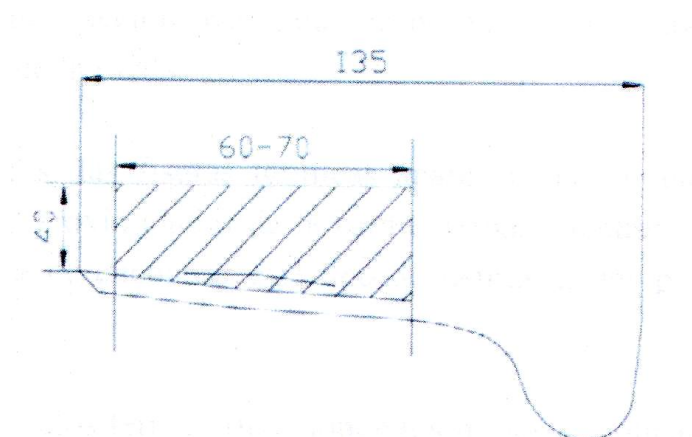


**FIGURA 4.4.VI FALLO PRODUCIDO POR SHATTERING**

La falta de grandes porciones de material producen grandes impactos que pueden dañar el carril y el tren e incluso provocar un descarrilamiento.

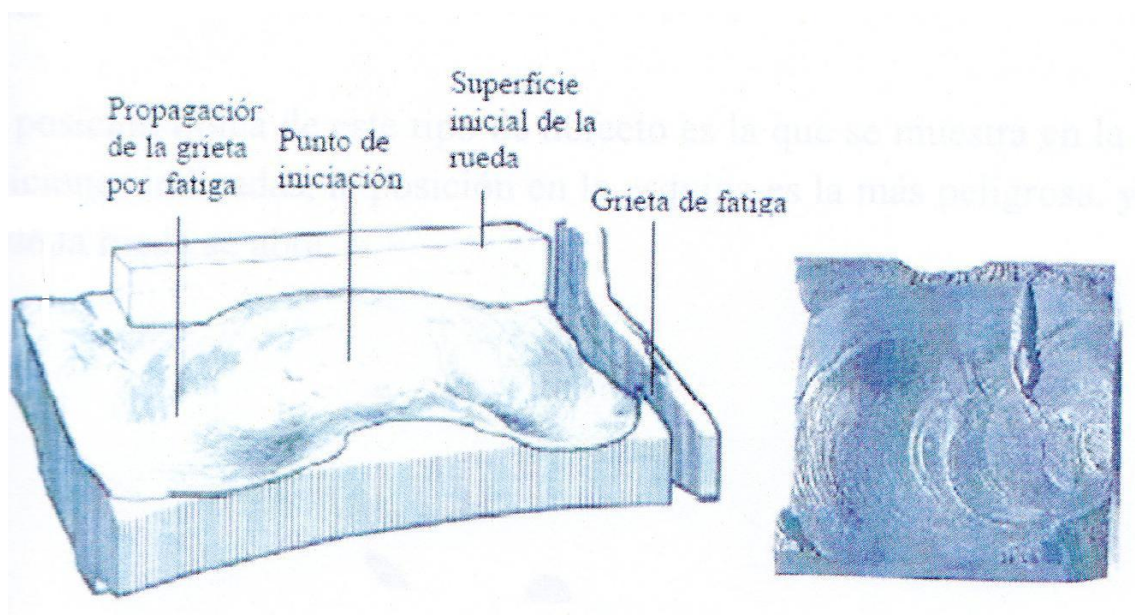
Los defectos “shattering” se producen en la zona más blanda de la rueda, en el caso de endurecimiento por deformación plástica se produciría en la zona de transiciones.

El área de interés para este tipo de delaminaciones suele ser una banda entre 60 y 70mm de la cara externa de la rueda, comenzando por la zona plana.



**FIGURA 4.4.VII ZONA LOCALIZACION DE FISURAS CIRCUMFERENCIALES EN LA LLANTA**

En la figura se muestra una rueda con este tipo de defecto en la que parte de la llanta se ha desprendido a partir de una fisura nacida en una inclusión que se ha desarrollado paralelamente a la superficie de rodadura, se ha propagado debido a las tensiones de fatiga y ha acabado desprendiendo una parte de la llanta como consecuencia de las tensiones centrifugas.



**FIGURA 4.4.VIII. CRECIMIENTO DE UNA FISURA POR SHATTERING**

#### 4.4.4 FISURAS TÉRMICAS

Las fisuras térmicas son muy peligrosas para la ruedas. Estas suelen estar presentes en los vagones de mercancía donde los frenos se aplican directamente sobre la banda de rodadura. Se deben a frenadas anormales, a la introducción de un flujo de calor en zonas de pequeña sección de la llanta o a la fricción de materiales que son agresivos al acero.

Las fisuras se originan por fatiga como consecuencia del resultado de distintos ciclos térmicos. Una vez la fisura se ha formado, se propaga en dirección axial, si existe un campo de tensiones de tracción, hasta que se produce la fractura frágil pudiendo provocar la rápida rotura de la rueda.

En ruedas europeas, las fisuras térmicas aparecen más frecuentemente en la banda de rodadura en las proximidades de la cara externa, mientras que en las ruedas americanas, es más frecuente encontrar este tipo de fisuras en las proximidades de la pestaña.

En el caso de vehículos ferroviarios, donde los frenos se aplican sobre discos de freno como son los trenes de alta velocidad, las fisuras térmicas pueden aparecer debido a un deslizamiento de las ruedas, ya sea por la diferencia en la velocidad de giro de las ruedas respecto al carril, o por estar estas desalineadas o desplazadas con respecto al centro de la vía.

Cabe comentar que modelar este tipo de fisuras es muy complicado ya que el estado tensionales de la rueda es el resultado de una combinación de cargas térmicas y mecánicas. Además propiedades mecánicas de la rueda están influenciadas por la temperatura.

De las posiciones iniciadas, la posición en la esquina es la más peligrosa, ya que puede producir que la rueda se abra.

#### 4.4.5. DEFECTOS EN EL VELO

Se tratan de fisuras circunferenciales que, partiendo de una zona defectuosa, se desarrollan por fatiga. Este tipo de fisuras pueden afectar a todo el espesor del velo y alcanzar grandes desarrollos circunferenciales, hasta producir la rotura brusca de la rueda. Estas zonas defectuosas pueden ser debidas a defectos metalúrgicos, pliegues de forja o laminación.... Capaces de generar una fisura bajo los grandes esfuerzos alternativos a los que se ve sometido el velo. También pueden producirse por entallas de mecanizado o por un diseño incorrecto, partes delgadas, taladros de equilibrio, radios de acuerdos cerrados, zonas de rigurosidad elevada.

Las fuerzas de servicio, especialmente las producidas en curvas, producen en el velo un fenómeno de fatiga. El momento más peligroso desde el punto de vista de la fatiga, es el paso a máxima velocidad por la curva de radio más pequeño.

La zona de transición entre la llanta y el velo es una zona peligrosa, donde el momento de flexión alternado causa fisura de fatiga en el interior de las ruedas. Otra zona peligrosa es la zona del velo próximo a los agujeros donde los valores de resistencia a fractura, son los más pequeños en toda la rueda. Asociado a este tipo de fractura, ocurrió un accidente en Junio de 1998 en Inglaterra cuando descarriló un tren de pasajeros que iba a 200Km/h debido a que un agujero de llanta no había sido bien terminado, dejando un saliente en el mismo lo que inició una fisura, dicho agujero además se encontraba en una zona de altas tensiones.

El desarrollo de fisuras se asocia a las altas tensiones a tracción generadas tras frenadas prolongadas y bajo la acción de las cargas verticales y laterales. Una fisura en el velo de las ruedas se desarrolla circunferencialmente como se puede observar





**FIGURA 4.4.IX FISURA CIRCUNFERENCIAL EN EL VELO**

#### **4.4.6 DEFECTOS EN EL CUBO**

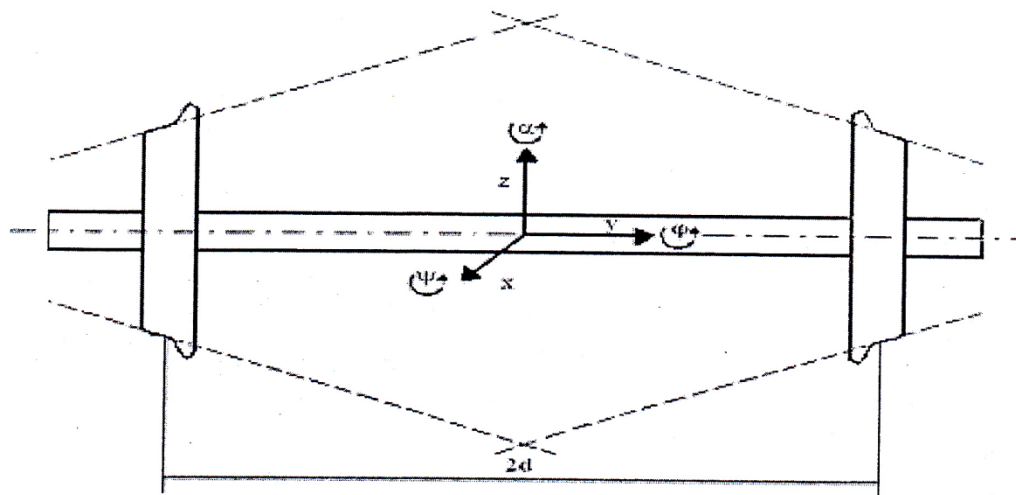
Generalmente se corresponden con fisura de progresión axial producidas por defectos internos o aprietes excesivos durante la operación de calado. Este tipo de defecto no es muy común

### **4.5 MOVIMIENTO DE LAZO Y ESTABILIDAD EN DINAMICA**

Un sistema mecánico es inestable cuando, si lo sacamos de su posición de equilibrio su respuesta en lugar de amortiguarse se amplifica con el tiempo. Diremos que es inestable si tiene al menos un modo de vibración con amortiguamiento negativo

Si un vehículo ferroviario circulando a velocidades bajas sufre una perturbación iniciara un movimiento oscilatorio amortiguado y retornara a su posición de equilibrio, si el mismo vehículo circulara a velocidad alta cualquier oscilación introducida en la marcha del vehículo tendería a amplificarse. A la velocidad en la que se pasa de la zona estable a la inestable, se la conoce como velocidad crítica. Cada vez que se realice un diseño, será imprescindible conocer la velocidad crítica, ya que nos limitara la velocidad máxima a la que podrá circular el vehículo. [14]

Se conoce por movimiento de lazo a una oscilación cinemática que describe el eje del ferrocarril cuando circula por la vía y es separado de la posición centrada. Consta de un movimiento lateral y de un giro del eje respecto del eje vertical.



**FIGURA 4.5.I GRADOS DE LIBERAD EJE MONTADO**

El origen del movimiento de lazo se debe a la conicidad de las ruedas,  $\delta_0$  que en el caso normal es de 1:20, lo que produce una variación en el radio de rodadura al desplazarse el eje lateralmente de su posición de equilibrio.

En todo cuerpo hay 6 grados de libertad. Las tres posiciones en el espacio y los tres ángulos de giros. En el modelo anterior hay 3 grados de libertad independientes que son X, Y y  $\alpha$ . Y es el desplazamiento lateral. El grado de libertad  $\alpha$  es el giro con

respecto al eje z. El grado de libertad X es la distancia recorrida por el eje, luego no es de importancia para el estudio. Los otros tres son dependientes.

Si desplazamos el eje hacia la izquierda, por ejemplo, se producirá un cambio en los radios de rodadura de las ruedas. Quedando de la siguiente manera:

$$R_A = R_0 + \delta_0 y$$

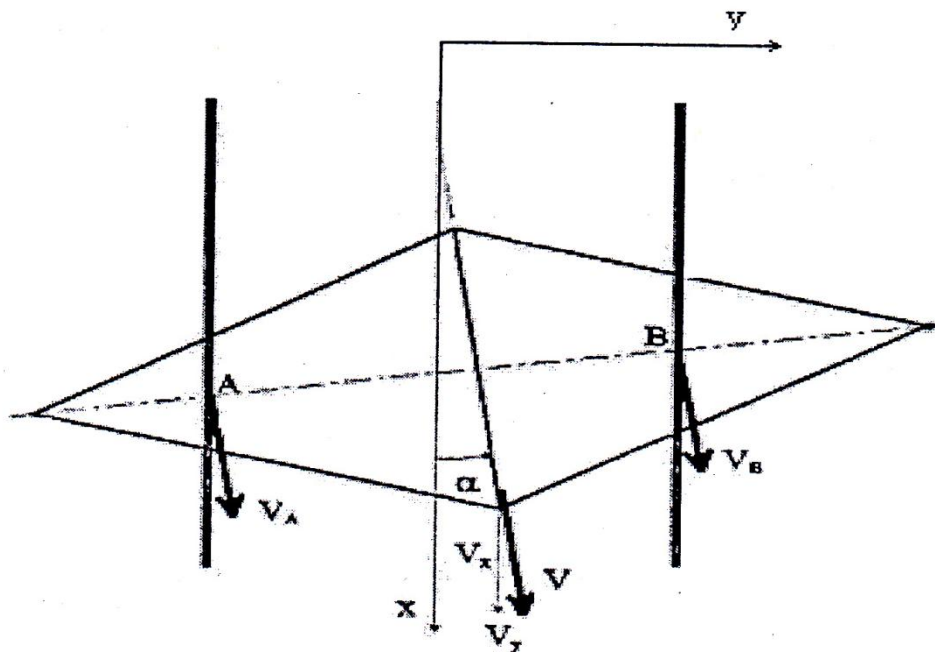
$$R_B = R_0 - \delta_0 y$$

Si la velocidad de giro es  $\omega$ , la velocidad de cada rueda será:

$$V_A = \omega R_0 + \delta_0 y$$

$$V_B = \omega R_0 - \delta_0 y$$

Que indica que la velocidad  $V_A > V_B$ , entonces el eje intentará volver a su posición de equilibrio inicial



#### 4.5.II- MOVIMIENTO DE LAZO

Por tanto el movimiento del eje corresponde a un movimiento armónico simple no amortiguado, con longitud de onda constante. La longitud de onda es la distancia para la que se repiten los valores de  $y$ ,  $\alpha$ .



## 4.6 FABRICACION DE RUEDAS

### 4.6.1 INTRODUCCION

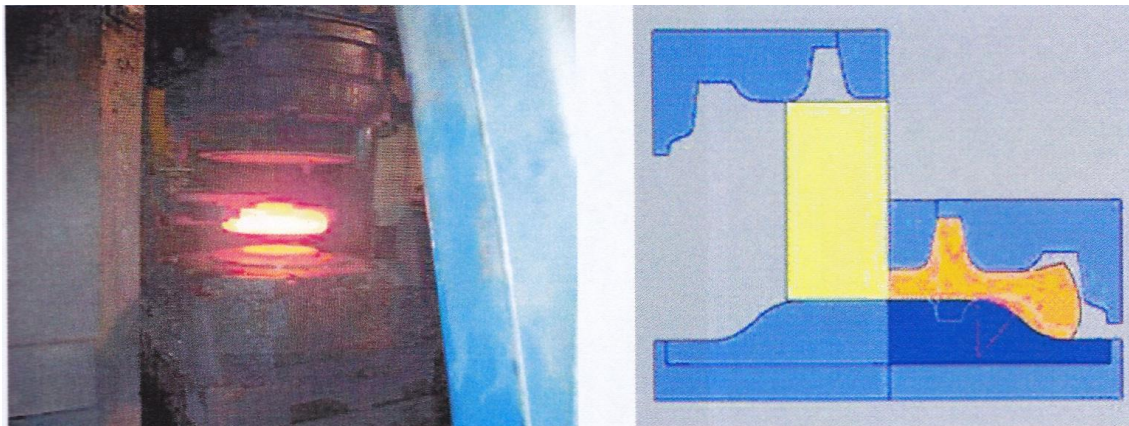
Las ruedas de acero se pueden construir mediante dos procesos: forja o colada. El procedimiento usado en Europa es la forja, mientras que en Estados Unidos es más usada la colada. Posteriormente, a la llanta se la somete a un proceso de temple y revenido dejando el velo y el cubo en estado normalizado.

Se explica a continuación, de forma resumida, las operaciones necesarias para la obtención final de la rueda en el caso europeo, es decir para una rueda forjada. Primeramente nos centraremos en el proceso de forjado y laminado para después comentar el tratamiento térmico realizado. [\[19\]](#)

### 4.6.2 PROCESO DE FORJADO Y LAMINADO

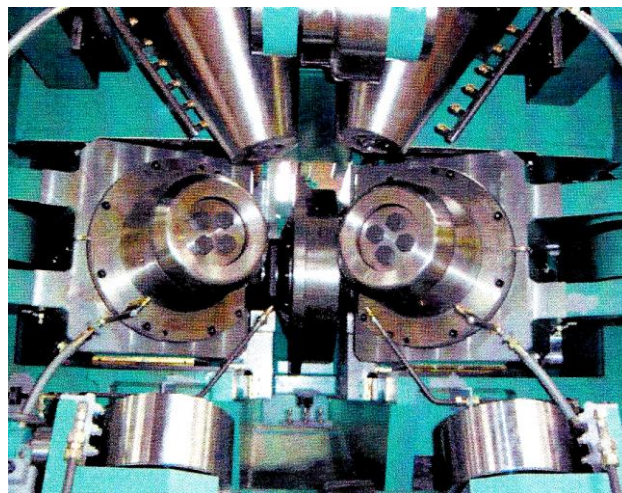
La secuencia de pasos es la siguiente:

1. El material de partida son bloques cortados a partir de lingotes o barras de material continuo, con unas tolerancias en peso muy cerradas, las cuales son calentadas hasta la temperatura de forja en un horno de hogar rotatorio. Los bloques calentados se transportan fuera del horno, se les somete a agua a alta presión para limpiar impurezas, se pesan y entonces es forjado en 2 operaciones, pasando a llamarse rueda en bloque
2. Después de la limpieza mencionada, un manipulando coloca el bloque en la primera estación aplicando la presión. El bloque es centrado con el eje de la herramienta por el dispositivo de centrado que está integrado dentro de la prensa, el desarrollo del material es el mismo en las subsiguientes operaciones de prensado



**FIGURA 4.6.I PREFORMA EN BLANCO Y VISTA PROGRAMA INFORMÁTICO**

3. Después del final del prensado, la rueda en blanco es sometida a operaciones que le proporcionan el perfil requerido. Este trabajo de repesar al rueda es efectuado en diferentes pasos utilizando los distintos rodillos que forman la máquina. Se consigue espesor óptimo, se da forma a la banda de rodadura, el acodamiento y el contorno interior, y por último se consigue la altura de la llanta necesaria.

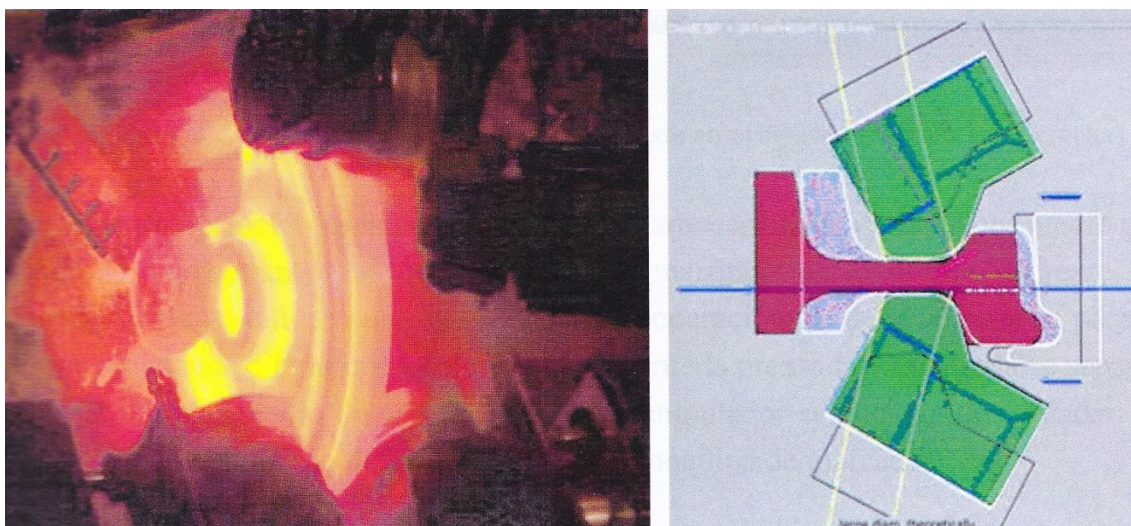


**FIGURA 4.6.II COLOCACION DE LAS HERRAMIENTAS PARA CONSEGUIR EL PERFIL REQUERIDO**

Debido a la posición vertical de las ruedas durante el conformado por rodillos, los defectos superficiales se evitan.

Según la dirección de conformado de la rueda, con este procedimiento se generan tensiones de compresión en la rueda. Este hecho tiene una influencia favorable en las propiedades del material así como en la exactitud en las medidas de la misma.

La distancia entre los rodillos y por tanto el espesor, es controlado durante el proceso de conformado según se produce el crecimiento de diámetro de la rueda. La altura de la llanta se consigue en el último paso de conformado por ajuste de los dos rodillos laterales.

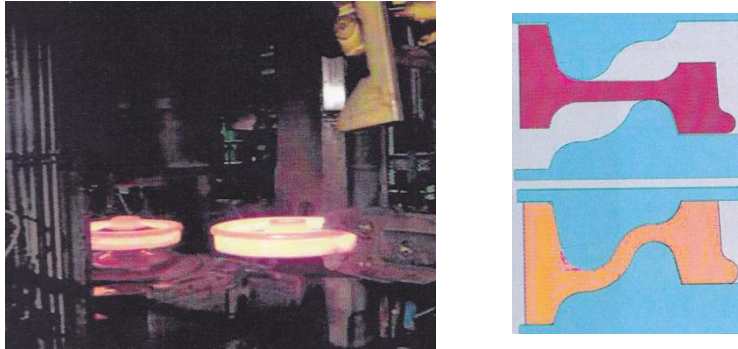


**FIGURA 4.6.III OPERACIÓN DE CONFORMADO Y VISTA EN PROGRAMA INFORMÁTICO.**

Las fuerzas de conformado son generadas de manera hidráulica y transmitida a la rueda en blanco a través de diferentes herramientas. Mediante distintos dispositivos como válvulas, supervisada por regulación electrónica y control de lazo, se adaptan instantáneamente con mucha sensibilidad los movimientos y presiones de operación según los requerimientos del proceso de conformado.

4. Un manipulador toma todas las ruedas conformadas desde el dispositivo de descarga y las traslada hacia la parte inferior de la matriz de la prensa para la deformación del velo de la rueda.

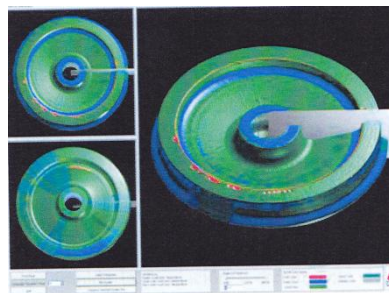




**FIGURA 4.6.IV. RUEDA DEFORMADA EN PRENSA Y VISTA EN PROGRAMA INFORMATICO**

5. La siguiente operación es la perforación de la parte central de la rueda por medio de un cilindro penetrante que está amarrado al martinete de la prensa. Durante la retirada de dicho cilindro una vez ha hecho la operación, se debe amarrar la pieza. Simultáneamente a la retirada del martinete, la rueda prensada y taladrada se separa de la prensa por medio de un elevador. Un manipulador se encarga de trasladar la rueda desde la prensa de deformación hasta la máquina de marcado.

6. Todo el proceso está controlado por dispositivos de medida láseres que se encargan del control dimensional de la rueda. Para explotar todas las partes de la rueda, este sistema se instala en una mesa rotatoria de 360°, de forma que los operarios tienen un soporte óptimo para hacer correcciones en la línea de producción y así evitar la producción de ruedas no válidas.



**FIGURA 4.6.V INDICACION DE LAS MEDIDAS DE LA MAQUINA LASER.**

Después del análisis de las medidas, un manipulador coge la rueda para un nuevo transporte hacia las instalaciones de tratamiento térmico y mecanización.



**FIGURA 4.6.VI CARGA DE LAS RUEDAS EN LINEA DE TRANSPORTE**

## **4.6.2 TRATAMIENTO TERMICO**

El tratamiento de temple al que se somete la llanta consiste en calentar la rueda en un horno hasta los 827°C para eliminar las tensiones generadas en el forjado. Posteriormente la llanta se enfría con agua pulverizada durante 345 seg. Como la primera temperatura está por encima de la temperatura de transformación de fase se produce la transformación de austenita a perlita durante el enfriamiento. La microestructura perlítica es la que da a la llanta su alta dureza.

En este punto la llanta se ha enfriado y se contrae, mientras que el cubo y el velo siguen calientes y relativamente más blandos. La rueda se deja enfriar al aire durante aproximadamente 4 minutos para dejarla posteriormente en un horno a una temperatura de 480°C durante dos horas para aliviar algunas de las tensiones generadas durante el

enfriamiento de la llanta. Durante este periodo el velo y el cubo se enfrían por debajo del punto de transformación y se contraen tirando de la llanta, que está más rígida. Este fenómeno introduce tensiones residuales de compresión en la llanta. Finalmente la rueda se deja enfriar a temperatura ambiente durante aproximadamente de seis horas.

El resultado es que la parte inferior de la llanta y el velo quedan sometidos a tracción mientras que el resto de la llanta queda a compresión. Este estado de tensiones residuales a compresión impide la formación y crecimiento de fisuras, reduciendo el riesgo de falla en servicio. El campo de tensiones residuales a compresión se crea hasta una profundidad de alrededor de 40mm desde la banda de rodadura. A medida que la rueda se desgasta es reperfilada, la capa de tensiones a compresión desaparece y la superficie de rodadura se acerca a la capa de tensiones a tracción.

En Europa las rueda se suministra según la ficha UIC (5ª Edición) “Especificaciones técnicas para el suministro de rueda monobloque de acero no aleado laminado para el material rodante motor y remolcado”, en 8 posibles calidades (R1 a R8) que se indican en la Tabla abajo mostrada. [20]

Calidad	Composición química (% máximo en peso)											Propiedades mecánicas		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	1+2+3	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	A (%)	KU (J)
<b>R1</b>	0.48	0.50	0.90	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	600-702	12-18	15
<b>R2</b>	0.58	0.50	0.90	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	700-840	9-14	10
<b>R3</b>	0.70	0.50	0.90	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	800-940	7-10	10
<b>R6</b>	0.48	0.40	0.75	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	780-900	15	15
<b>R7</b>	0.52	0.40	0.80	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	820-940	14	15
<b>R8</b>	0.56	0.40	0.80	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	860-980	13	15
<b>R9</b>	0.60	0.40	0.80	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.05	0.05	900-1050	12	10

1+2+3: Cr+Mo+Ni

**TABLA 4.6.I. COMPOSICION ACERO DE LAS RUEDAS**

## 4.6.3 RELACION ENTRE FABRICACION Y RESISTENCIA A FRACTURA

### 4.6.3.1 INTRODUCCION

Los criterios de la mecánica de la fractura no fueron tenidos en cuenta en las exigencias de los ferrocarriles hasta la década de los 80. La más importante usada en Europa no necesitaba un test directo de los parámetros para evitar la fractura frágil en las ruedas, no solo para el diseño, que no tenía la oportunidad de optimizar la forma del alma en un análisis de elementos finitos, sino también en términos de criterios de su suministro.[\[26\]](#)

El punto de referencia para la evaluación del nivel de calidad de la rueda en Europa fue la especificación 812.3 de la UIC, en la cual el límite aceptable de la rigidez a fractura no se mencionaba, hasta que la ERRI introdujo el criterio. Los aceros del grado R7T fueron usadas para las ruedas conducidas, las cuales tiene frenos de zapata, ya que este grado se le supone menos expuesto a las fracturas. En ese periodo, la velocidad de los coches aumentó y se registraron los mismos casos de fractura frágil en ruedas de ferrocarril R7T. La primera aplicación del criterio de la mecánica de la fractura se puede ver en documentos de análisis de fallos, de comisiones especializadas de universidades o laboratorios de investigación, para esclarecer porque las ruedas pudieron romperse conforme a las obligaciones de la UIC. Hoy, esta situación no sorprende, porque se sabe que las obligaciones de la rigidez a fractura no están mencionadas en las exigencias de su suministro y los materiales R7T que cumplen con la CEN de UIC pueden, en la práctica, tener diferentes valores de rigidez a fractura.

Estadísticas de ruedas con frenos de zapata que frenaron durante el servicio recogidas de diferentes ferrocarriles representados el único indicador de la calidad del producto, cuando los clientes de ferrocarriles son muchos. En 1975, algunos casos de fallos en locomotoras con ruedas bloque han hecho puesto a las ferrocarriles suizas SBB a trabajar con la primera aplicación del (LEFM) criterio de mecánica de la fractura

elástico-lineal, gracias a los datos de un fallo recogidos por un cliente. De cualquier forma, los SBB recogieron datos significantes de los fallos en ruedas desde 1980 (empiezan a doblarse en 1985) principalmente ocurridos en dos pasos de los Alpes, Gotthard y Lötschberg-Simplon, los cuales tienen grandes inclinaciones.

Para conseguir aclarar esta situación, SBB comenzó un programa de investigación de los casos de bloqueo en ruedas R7T con fallos inesperados. La tarea en cooperación con el ETH de Zurich fue determinar la rigidez a fractura de aquellas ruedas que rompieron en servicio y evaluar el nivel interno de tensión que sufrió la llanta durante y después de la frenada. Todas las tareas preliminares fueron realizadas por los grupos de ORE y del comité B169 del ERRI, los cuales han tenido el mérito de examinar y resolver el problema.

En la misma época, los ferrocarriles italianos Trenitalia no sufrieron casos de fallos inesperados en bloqueos de ruedas. Este hecho está relacionado con el alto nivel de calidad exigido por Trenitalia en su suministro comparado con los de la UIC en ese periodo.

Los datos estadísticos de la década 80 demostraron que Lucchini Sidermeccanica fabricaron toda la producción de rueda de Trenitalia en la factoría de Lovere. Un tercio de las ruedas usadas por SBB venía de Lovere también. En ambas poblaciones de ruedas, la fractura frágil de las ruedas R7T no se produjo. La relación entre la seguridad en servicio con los niveles de calidad del acero ha sido puesta en evidencia por muchas marcas de ferrocarriles. Si se estudian los documentos de ese periodo, se demuestra que Trenitalia fueron más exigentes que otros ferrocarriles de la UIC

Restricciones en el análisis químico, propiedades mecánicas y la introducción de parámetros indirectos y adicionales son visibles en las exigencias de su suministro de Trenitalia empezando en la década de los 80. El parámetro indirecto más importante que marca las diferencias es la introducción de la exigencia de aceros desgaseado completamente desde 1983 para mejorar el nivel de micro-limpieza y obtener la reducción de defectos internos, detectables por test de ultrasonidos. Como consecuencia



de este intento, la resistencia a fatiga y la rigidez a fatiga fueron implícitamente cubiertas.[26]

La aproximación de Lucchini Sidermeccanica en términos de la mecánica de la fractura estuvo influenciada por los siguientes parámetros:

- Influencia indirecta de las exigencias de Trenitalia en los procesos de fabricación
- mejoras de la mecánica de la fractura en la planta de Lovere por la mejora del proceso de fabricación

Desde el principio del siglo, la planta de Lovere ha fabricado principalmente ejes montados, combinados con forjas y moldes para motores, petro-química y aplicaciones extranjeras. Esto contribuye de un modo original y efectivo a desarrollar el conocimiento de la metalurgia que se aplica al material rodante. La planta está en constante cambio, a niveles organizativos e ingenieriles, en líneas como las exigencias de su suministro de los ferrocarriles.

Particularmente, la planta de Lovere ha tenido siempre una referencia con los ferrocarriles italianos de Trenitalia, que han encontrado la respuesta a sus exigencias en la calidad, resumidas en las exigencias del material resuministro, que fueron y son más restrictivas que las exigencias de la UIC. Para encontrar esas exigencias y obtener un completo conocimiento del comportamiento de los materiales producidos, la fabricación y controlar el proceso se ha pasado a través de fases intermedias de la caracterización de los materiales. Una caracterización sistemática se ha desarrollado desde los 1970 en cooperación con el Centre Sviluppo Materiali CSM de Roma y Trenitalia, aplicando las innovaciones de los criterios de la mecánica de la fractura,  $K_{IC}$ ,  $K_{ID}$ ,  $da/dN$ , estudiando los fenómenos del daño soportado por microscopia óptica y eléctrica. Esta caracterización permite la mejora del proceso de fabricación.

La primera aproximación con la mecánica de la fractura fue aplicada a los ferrocarriles por Lucchini Sidermeccanica en los años 60, como consecuencia de sus actividades con el CSM, recogidas en muchos documentos. Esta aproximación estaba

orientada a garantizar valores reales de  $K_{IC}$  ( $a, b \geq 2.5 (K_Q/YS)^2$ ) y, por esta razón el grosor de los ejemplos fueron disminuidos para obtener condiciones de tensión plana en la punta del agujero. En algunos casos, los ejemplos del material no estaban conectados con los componentes testeados, pero produjeron diferente ratios de forja y parámetros de tratamientos térmicos. Ninguna representación completa de grandes secciones fue producida y testeada en ese periodo. Para los test de muestras de grandes secciones, se necesitan grandes máquinas. En 1972 Lucchini Sidermeccanica instaló un equipo de testeo MTS de 2500 kN, uno de los mayores aparatos del momento. El criterio de la fractura elástica mecánica lineal ha sido aplicado en el análisis de fallos en las décadas de los 70 y los 80, como se puede deducir de los informes técnicos de esos años. La cooperación entre expertos de la mecánica de la fractura del CSM y otros laboratorios de investigación duró muchos años.

#### **4.6.3.2 RELACION ENTRE RIGIDEZ A FRACTURA Y MICROLIMPIEZA**

Las primeras intuiciones sobre la relación entre rigidez a fractura con los parámetros de fabricación fueron en el principio de los 70. Esto condujo al convencimiento de que la calidad del producto dependía de la calidad del acero y, de este modo, la planta de Lovere prestó particular atención a esta fase, teniendo además en cuenta las exigencias de Trenitalia. Trenitalia exigió de aceros completamente desgaseados en la fabricación de sus materiales rodantes desde 1983. Desde 1976, las operaciones de refinado en cuchara y desgaseado realizadas en la planta ASEA-SKF, ayudaron a mejorar las características de micro-homogeneidad y la micro-pureza. La fabricación del material rodante se fue perfeccionando hasta 1983. Después de esa fecha, la entera producción de ruedas estaba desgaseada. El bajo contenido de inclusiones no metálicas, están unidas con los bajos porcentajes de gases, e impurezas de S y P, han hecho estos aceros particularmente buenos para estas aplicaciones en las cuales se necesitan buenas resistencia a fatiga y rigidez a fractura.

Una evolución en el proceso de fabricación del acero se ha realizado en el 2000, después de la modernización de la planta. Hoy, la planta de acero de Lucchini Sidermeccanica está equipada con una caldera de arco eléctrico (EAF) U.H.P, con

capacidad de 50 toneladas, con “puntos de fuego”, capaz de inyectar  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CaO}$ , C (grafito), que permite la formación de espumas de escorias y, consecuentemente, la reducción del tiempo entre vertidos. Esta caldera de fundición permite un control preciso del grado de oxidación del baño y está equipada con un sensor de paro ante la escoria durante el vertido que evita la que la escoria acabe en la cuchara. El control de la escoria mejora la limpieza, la desulfuración y la desgasificación del acero.

Las cucharas son de dolomita/magnesia y cada una tiene segmentos porosos en el fondo. La agitación de Ar mejora la micro-limpieza del líquido del acero. Una nueva caldera está trabajando desde el 2000 en la planta de acero y está equipada con máquinas de adición de  $\text{CaSi}$ , Al, C (grafito), B, que garantiza la cercanía de los rangos.

La innovación del sistema del tanque de degaseado ha remplazado el ASEA-SKF llevando a niveles muy bajos en degaseado, gracias a la acción de los eyectores de vapor para asegurar la reducción drástica de gases como  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$ . En la estación VD-VOD, es posible añadir aleaciones, aditivos, mallas en el núcleo en atmósferas inertes. Durante la fase de vaciado, la agitación es obtenida por la adición de los Ar de los sectores porosos.

En el foso de vertidos, el fondo de los vertidos de los materiales rodantes se transforman gracias al transporte de las cucharas, equipadas con aparatos de control de la velocidad y protecciones de los gases inertes. Estas facilidades garantizan un buen control del fondo de los vertidos.

En resumen, el proceso del acero instalado en 2000 ha traído las siguientes ventajas:

- Micro-limpieza y homogeneidad estructural del acero
- Bajos contenidos de P y S
- Minimización de las inclusiones no metálicas

- Repetición industrial del ciclo
- Racionalización del flujo de trabajo

Además, la influencia del proceso de fabricación del acero, la fabricación de la rueda se ha considerado el tratamiento térmico como decisivo en la fase de alcanzar las exigencias. Para permitir que el grado del acero diseñado manifieste el óptimo de las exigencias, se necesita operar los tratamientos térmicos conforme a unos parámetros selectivos muy importantes. Desde el punto de vista de la mejora continua del producto que Lucchini Sidermeccanica llevó en 2003 la innovación en los tratamientos térmicos de las ruedas. El análisis de puntos débiles y problemas concernientes a los anteriores procesos de tratamiento térmico han representado el punto de partida para la identificación de la idea de ciclo de tratamiento térmico. Variaciones inferiores de temperatura de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  en la austenización y el templado han sido grabadas por aquellos que las realizaron. Conforme a la fase de enfriado de las llantas, Lucchini Sidermeccanica decidió mejorar la tecnología por inmersión alternativamente con rociarlas en movimiento como hacen otros fabricantes. Se diseñaron tanques especiales, capaces de permitir un tratamiento de enfriamiento rápido y homogéneo, garantizando al mismo tiempo el enfriamiento por aire del alma de la rueda. Para obtener una mejora en la uniformidad del intercambio térmico, fue requerido para trabajar en los flujos de fluido y en la constancia de la temperatura del agua mediante unos agujeros esfuerzo cortantes capaces de garantizar que no hay vapor en la interfaz agua-rueda.

En base al conocimiento de las curvas CCT de los materiales, Lucchini Sidermeccanica ha definido el tiempo de transferencia de la rueda desde la caldera de austenización a la llegada al agua y su estancia en el agua.

#### 4.6.3.3 METODO

La aproximación de Lucchini Sidermeccanica en términos de mecánica de la fractura fue influenciada por las instalaciones que mejoraron el proceso de fabricación. En 1991, para aplicar metodologías de testeo conforme a los criterios de la mecánica de

la fractura, las ruedas fueron definidas por el gupo ORE B 169/4 de ERRI, Lucchini Sidermeccanica empezó a investigar moviéndose en dos direcciones:

- 1.- validez y significado del parámetro de la mecánica de la fractura  $K_Q$  usado para fijar el mínimo nivel al cual se puede garantizar y aplicar los parámetros alternativos
- 2.- estudio de la relación entre las características micro-físicas de los aceros y los valores de la rigidez a fractura y el proceso de fabricación.

Con la introducción de nuevas exigencias en la mecánica de la fractura de la normativa de la UIC era exigida, durante un periodo de dos años, realizar el test CT 6 en cada grupo de ruedas R7T. Para profundizar en este asunto, Lucchini Sidermeccanica decidió mejorar la capacidad de testear instalando un nuevo laboratorio dedicado a los parámetros de la fractura:  $K_{IC}$ , CTOD,  $J_{IC}$ , propagación sub-crítica de la fisura, test  $da/dN$  y test de la nucleación de la fisura  $\Delta K_{th}$  [26].

Los pasos más importantes a analizar son:

- Industrialización del criterio
- Validación de los tradicionales y innovación de los criterios
- Mejorar los procesos por la definición y el seguimiento de los índices de calidad, indicativos de buena producción.

Los laboratorios técnicos, que permiten una caracterización completa del producto desde un punto de vista mecánico, necesitan ser completados para mejorar la capacidad de producción de las muestras CT 30. Son las máquinas de muestras CT un CNC robotizado fue instalado para obtener una forma acabada en 45 minutos con agujeros “agujeros Chevron” y asientos para medir la tensión

Una de 500 kN y tres de 100 kN máquinas para realizar test de tensión fueron instaladas para responder a las operaciones de pre-fisurado y la validación de los test.

Los aparatos están equipados con programas de cálculo que reducen los tiempos del test.

Después de maquinar muestras CT 30 se pre-fisura en el grupo hidráulico de tres de 100 kN. El tiempo de pre-fisurado para la muestra CT 30 de ruedas R7T es de unos 40 minutos

Entonces la muestra está lista para ser testada en una maquina de 500 kN o en una maquina de 2500 kN, cuyo software está completamente dedicado al cálculo de los parámetros de la mecánica de la fractura

La capacidad de medir la rigidez a fractura d los materiales y recoger correctamente los datos ha ayudado a desarrollar el proceso de fabricación de las ruedas.

En el tiempo, los laboratorios de metalográficos, aparatos están dedicados a medir parámetros micro-estructurales (crecimiento de grano, ratio de inclusiones, separación de fases) y entonces relacionarlas con la mecánica de la fractura.

Capacidad de realizar el test de análisis de fallo ha sido mejorado en los laboratorios metalográficos en 1989 gracias al SEM (escáner microscópico de electrones) equipado con la sonda EDX (espectroscopía de dispersión de la energía).

Dos instrumentos dedicados a determinar las curvas CCT y TTT, han sido instalados en 1991 para calibrar y configurar la correcta forja y parámetros de los tratamientos térmicos y la mejorar el análisis para evitar la presencia de Bainita en la ferrita y la perlita. Gracias a estos aparatos, Lucchini Sidermeccanica ha ganado mucha experiencia en los ratios de las inclusiones no-metálicas, que es el resultado principal de la práctica de la desoxidación siempre presente en los aceros. La formación, crecimiento y evolución de las inclusiones no metálicas depende de los procesos metalúrgicos primarios y secundarios. Por estas razones, es importante identificar y clasificar la forma y tamaño de las inclusiones para garantizar el aumento de la demanda de la limpieza de los aceros.

Dos diferentes aproximaciones en términos de ratios de inclusiones no metálicas han sido mostradas:

- 1.- medir lo peor del campo o tamaño máximo, que es Metodo M DIN 50 602 o ASTM E45 Método A.
- 2.- Medir las inclusiones no metálicas de un tamaño específico (n) y superior, llamado Método K DIN 50 602

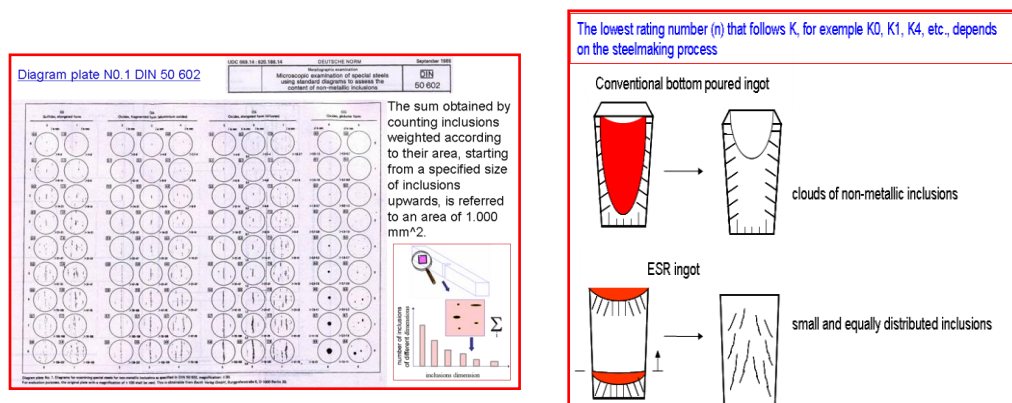


FIGURA 4.6.VII GRAFICA PARA LA MEDICION DE LAS INCLUSIONES NO METALICAS

Esto está hecho para:

- grabar los datos de las inclusiones no metálicas de un tamaño n y superior
- dar un grado de pureza al molde o al baño por índice comprensible K(n) caracterizando el área de las inclusiones.
- obtener, desde los tamaños fijado y mayores en las figures, un número proporciona del contenido de la inclusiones en los aceros.

Lucchini Sidermeccanica hace la cuenta desde el tamaño 0 hacia arriba de los “valores característicos de K”, llamado “k0” y es usado como índice informativo de calidad. [27]



Muchos mecanismos de daño afectan a los componentes estructurales sujetos a cargas cíclicas. Esto puede ser agrupado en tres categorías: desgaste, superficie y fatiga sub-superficial, la cual puede referirse al contacto giratorio (RCF). Estos mecanismos compiten entre sí: por ejemplo, el desgaste puede quitar fisuras superficiales. Estos tienen diferentes ratios y valores umbrales, los cuales pueden estar presentes en algún momento. El fallo final es debido al mecanismo más rápido. El fenómeno “Roller Contact Fatigue”, fatiga por rodamiento, es el más común y el más peligroso. En particular, la fatiga sub-superficial es típica en superficies endurecidas y que ocurra depende del gradiente de fuerzas. La fatiga superficial es más general. Esta parece y evoluciona dependiendo de las condiciones de las operaciones, en particular de la presencia de móviles y fluidos en contacto con una superficie. La zona de concentración de tensiones causa por imperfecciones metalúrgicas o geométricas la formación de la fisura. Su crecimiento es de modo II en las primeras fases, seguida de la propagación del modo I. La acción de la apertura de la fisura es debida al moviendo de las tensiones y al efecto de los fluidos lubricantes atrapados entre las caras de las fisuras. Los efectos después llegan a ser importantes con el crecimiento de la longitud de la fisura, mientras que la iniciación de la fisura y su primera propagación muestra que es favorecida por un contacto seco. La necesidad de estudiar más profundamente la resistencia RCF ha llevado al desarrollo de un criterio nuevo y simplificado por Lucchini Sidermeccania que se base por un lado en los parámetros tradicionales y en el otro en los indirectos que no son muy usuales como la ductilidad y la fuerza cíclica de plastificación CYS.

#### **4.6.3.4 RELACION ENTRE RIGIDEZ A FRACTURA Y MICROESTRUCTURA**

La composición química y la condición del tratamiento térmico de la rueda son especificadas por el grado del material. En los últimos 30 años, ha habido mejoras importantes en el proceso de fabricación de las ruedas. Muchas razones pueden influir en la elección del material de la rueda como la resistencia a desgaste, la fuerza o el coste. De todas formas, La micro-estructura es responsable de las propiedades mecánicas incluidas en la rigidez a fractura. En las siguientes relaciones entre la estructura y la rigidez a fractura vienen mencionadas.

Los investigadores del instituto de metalurgia, ETH de Zurich durante los últimos 20 años, en la calidad de las ruedas R7 muestran algunas medidas típicas de cómo la influencia en las exigencias de la microestructura ha mejorado la rigidez. Como hecho, se señala que la microestructura perlítica limita la rigidez. Combinando esfuerzos se llega a valores aceptables de rigidez en ruedas de R7T

#### **- Inclusiones**

Un análisis químico equilibrado es necesario para reducir o evitar las inclusiones no metálicas, las cuales actúan como concentradores de tensiones y sitios potenciales para el inicio de las fisuras, así como la reducción de la rigidez a fractura. Además tales inclusiones afectan al comportamiento a corrosión. Normalmente las inclusiones no metálicas pueden ser encontradas en aceros R7. Después de un tratamiento metalúrgico con Ca las inclusiones se tornan esferas. La concentración de tensión en esferas se reduce drásticamente.

#### **- Espacio entre láminas**

El espacio entre laminas puede cambiar en estructuras perlíticas con el tratamiento térmico adecuado y añadiendo aleaciones. Ruedas de R7T tiene una microestructura ferrítica-perlítica. La Perlita consiste en láminas de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) y ferrita. La cementita es dura y frágil y la ferrita es blanda y dúctil. Un ejemplo viene en la Fig. 10 y la Fig. 11 mostrando un incremento de la dureza cuando el espacio de las láminas se reduce.

#### **- Tamaño de grano**

Una microestructura perlítica homogénea con un tamaño fino de grano ( $\sim 10 \mu\text{m}$ ) es crucial para unas buenas propiedades mecánicas

#### **-Grano con ferrita en el borde**

Para conseguir un tamaño fino de grano la cantidad de ferrita es 10-15 % lo cual ayuda a mejorar la rigidez a fractura de los aceros R7.

### -si hay algún fallo

Para mejorar la rigidez, el valor de impacto, se realizan algunos tratamientos térmicos. Aquí la cementita laminar está formada por esferas y así influye en la rigidez, reduciendo drásticamente la resistencia y la resistencia a desgaste.

### - Estructura Bainítica

Otro punto importante es la presencia de la bainita. Estas son buenas razones para no tener bainita en la llanta de la rueda de R7T. Una es reducir el comportamiento a desgaste. Esto se demuestra en la siguiente figura y con los ratios de desgaste de las dos estructuras de ferrita y bainita. Por ejemplo, el ratio de desgaste para la dureza de 280 HB es completamente diferente. En este caso la estructura perlítica es mejor que permanezca. La homogeneidad en la circunferencia de la rueda es muy importante.

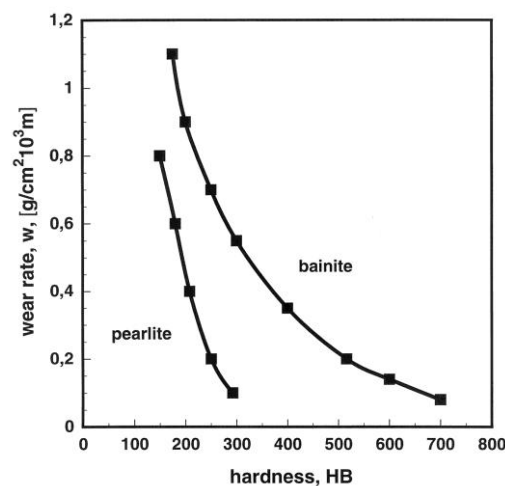
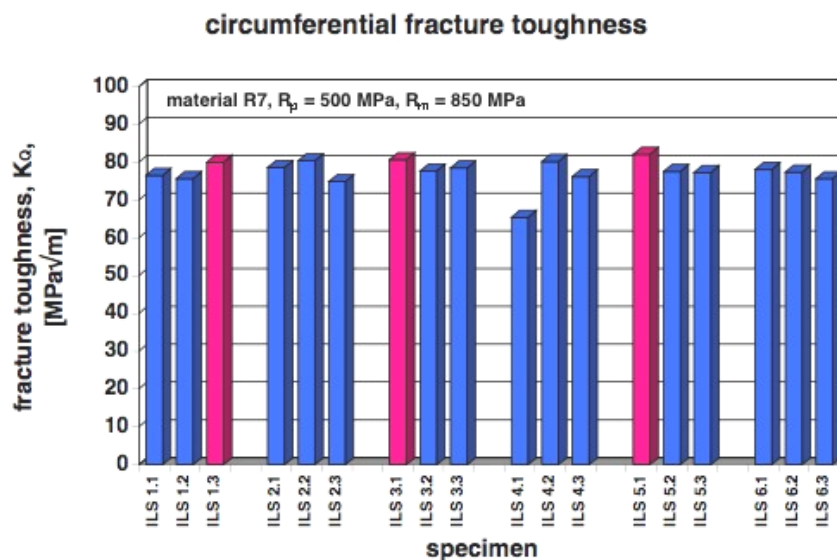


FIGURA 4.6.VIII DUREZA FRENTE A TASA DE ROZAMIENTO

### - homogeneidad

Como se señaló anteriormente la homogeneidad no solo de la microestructura sino también de cualquier propiedad de la rueda debe permanecer constante. Esto se muestra

por medidas de la rigidez a fractura en la circunferencia de la rueda. Cada 60 grados tres muestras cercanas fueron tomadas y probadas conforme a la normativa. Los resultados mostrados en la Fig. 15 muestran las no homogeneidades y sus problemas: Si unas tomas los valores ILS 1.3, 3.1 y 5.1 todo va bien, pero con el valor ILS 4.1 se tendran serios problemas



**FIGURA 4.6.IX RIGIDEZ A FRACTURA CIRCUNFERENCIAL EN LA RUEDA**

Para poner en evidencia la tendencia, se analizaron estadísticamente valores  $K_Q$  y  $K_{EE}$  de la producción de ruedas R7T obtenidos de tres periodos diferentes:

- Primer periodo es 1986, antes de la introducción de  $K_Q$  en la normativa UIC
- Segundo periodo es en 1996, después de la introducción de  $K_Q$  en la normativa UIC
- Tercer periodo es el 2006, con el nuevo proceso de fabricación y los nuevos tratamientos térmicos

La tendencia de los valores de  $K_Q$  indican un incremento del 6 % cada década, con una disminución de la desviación estándar, empezando por la situación inicial, en 1986, no tan mala, considerando que la rigidez a fractura no era exigida. Empezando desde un valor medio de  $K_Q=80\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  con un mínimo de  $K_Q=65\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  en 1986. En 2006 la

media del valor alcanzo los  $K_Q=91\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  con un mínimo de  $K_Q=84\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ . La media del valor en el periodo entre 1986-2006 aumenta un 13 %.

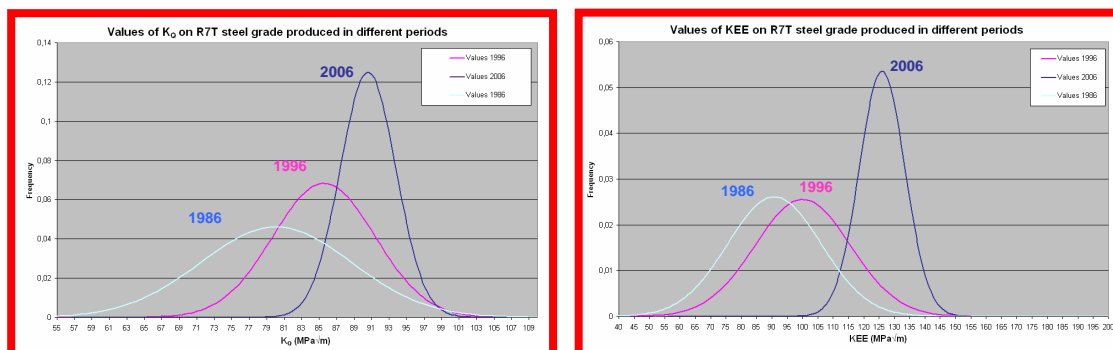


FIGURA 4.6.X. DISTRIBUCION DE RIGIDECES SEGÚN EL AÑO

La tendencia de la media de los valores de  $K_{EE}$  indica un incremento del 10% entre 1986 y 1996, y uno del 26% en la siguiente década, con una reducción de la desviación estándar. Si se considera la situación inicial, 1986, se tiene que recordar que la ASTM E992 fue escrita en 1984 y  $K_{EE}$  era muy innovador.

$K_{EE}$  puede considerarse un parámetro muy útil, alternativo a J-Integral  $\{J_{IC}\}$ , que da información en términos de la mecánica de la fractura en el campo plástico, incluso, si hasta ahora, este parámetro ha sido utilizado solo como índice de calidad a título informativo.  $K_{EE}$  combinado con  $K_Q$  pueden dar más información de la rigidez a fractura en las ruedas y puede fácilmente ser usado para definir un criterio del material durante la inspección. En cualquier caso, empezando con el valor medio de  $K_{EE} = 91 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  con un mínimo de  $K_{EE} = 67 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  de 1986, en 2006 la media del valor alcanzo  $K_{EE} = 126 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  con un mínimo de  $K_Q = 110 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ . La media de los valores de  $K_{EE}$  en estas dos décadas aumento un 47 %.

Como se describe en [28] un buen índice para las propiedades mecánicas de los aceros es el producto de “límite elástico por la rigidez a fractura”. El sentido de este índice es que el incremento en la rigidez a fractura no debe reducir el límite elástico del material. Concerniente a la rigidez a fractura del material R7T puede ser una ventaja un alto límite elástico.

Para comprender mejor la tendencia descrita en las figuras, valores estadísticos de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  han sido pintado frente al límite elástico ( $YS$ ). Del análisis de las figuras se puede ver un cambio hacia arriba en los valores del  $YS$  y de la rigidez a fractura  $K_Q$ - $K_{EE}$  han tenido lugar en la buena dirección: mayor límite y más rigidez. Los valores de  $YS$  en la producción de los R7T son mayores de 520 MPa, como se exige en la normativa EN 13262[1], para los periodos de 1996-2006. Los valores de  $K_Q$  de 2006 mejoran en valor absoluto, pero particularmente en homogeneidad, siendo el rango de desviación muy estrecho, si se comparan con los valores de 1996.

Para medir la homogeneidad de los parámetros  $K_Q$  y  $K_{EE}$  en la misma rueda R7T, pertenecientes a los tres periodos de producción, tres muestras CT 30 para cada posición de  $60^\circ$  se recogieron siguiendo el esquema. La media de los valores de las tres muestras se pintan y analizan. Los resultados del primer periodo (1986, antes de la introducción de  $K_Q$  en la normativa UIC, incluso si cada valor del parámetro  $K_Q$  es mayor a  $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , la media del valor es un poco menos de  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ; a  $60^\circ$   $K_Q = 77 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , a  $180^\circ$   $K_Q = 79 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y a  $240^\circ$   $K_Q = 79 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

La media del valor  $K_Q$  de los 18 test es  $81 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con un valor mínimo de  $71 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y uno máximo de  $125 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ; todos los valores están en un rango de  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . La media de  $K_{EE}$  de los 18 test es  $98 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , con un valor mínimo de  $74 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y uno máximo de  $125 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ; todos los valores están en un rango de  $51 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

Se puede ver que los valores de menores de  $K_{EE}$  están localizados en las tres posiciones angulares de  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $120^\circ$  que representan la mitad de la rueda.

Los resultados del segundo periodo (1996): ambos valores de cada posición y la media de los valores de cada posición con respecto a las exigencias de la normativa de  $70$  y  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . La media de  $K_Q$  de los 18 test es de  $82.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con un valor mínimo de  $78 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y uno máximo de  $92 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ; todos los valores obtenidos están en un rango de  $44 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Los resultados del tercer periodo (2006), los valores singulares de cada posición angular y los valores medios de cada posición de las normativas de 70 y 80. La media de  $K_Q$  de los 18 test es de  $91 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con un valor mínimo de  $86 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y uno máximo de  $97 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ; todos los valores están en el rango de  $11 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . La media de  $K_{EE}$  de los 18 test es de  $131 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con un valor mínimo de  $115 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y uno máximo de  $145 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ; todos los valores obtenidos están en el rango de  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

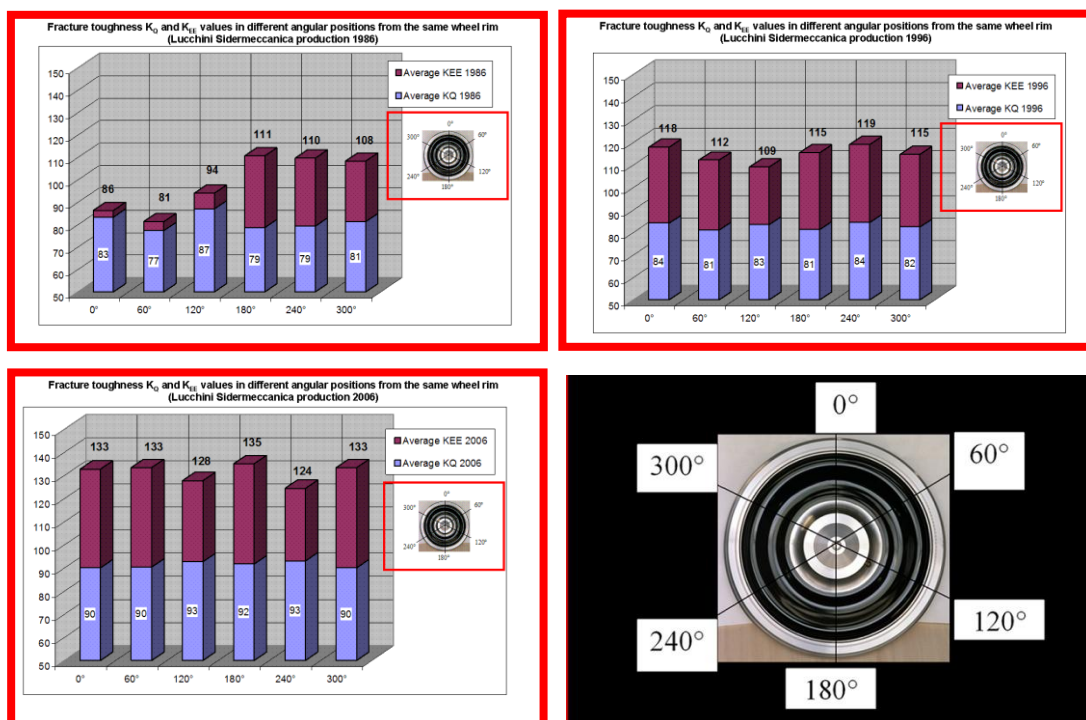


FIGURA 4.6.XI DISTINTOS VALORES DE  $K_Q$  Y  $K_{EE}$  EN LA POSICION DE LA RUEDA

Los resultados de la mecánica de la fractura de los periodos representativos de las tres décadas dan una visión muy interesante de la tendencia de la rigidez a fractura; de este modo, lo más importante es la relación entre los parámetros micro-estructural y la rigidez a fractura. Por esta razón, Lucchini Sidermeccanica ha realizado la caracterización de los materiales en términos del ratio de inclusiones, para mejorar el proceso de fabricación del acero, que es la mejora más importante para controlar la micro-limpieza del acero. Las inclusiones no metálicas, resultado del proceso de desoxidación, están siempre presentes en el acero; es importante identificar y clasificar el tipo y tamaño de las inclusiones, para garantizar el incremento en la demanda de la limpieza del acero, teniendo bajo control el proceso de fabricar acero.



El ratio de inclusiones no metálicas en ruedas está hecho con muestras de cada baño, tomadas de la rueda, seleccionados de cada muestra representativa. La superficie es limpiada y la muestra, después de la preparación metalográfica de las superficies, es probada a 100x por un microscópico óptico. Dos aproximaciones en términos del ratio de las inclusiones no metálicas se han seguido:

- 1) Ratio de las peores zonas o máximo tamaño- Método M DIN 50 602
- 2) Ratio de las inclusiones no metálicas de tamaño  $n$  o superior, Método K DIN 50 602.  
Lucchini Sidermeccanica introdujo el método de control de la producción, haciendo cuentas desde el 0, “valor K característico”

La formación, crecimiento y evolución de las inclusiones no metálicas dependen de los procesos primarios y secundarios y el índice de calidad “ $k_0$ ” es usado por Lucchini Sidermeccanica para relacionar el proceso de fabricación del acero con la rigidez a fractura. De este modo, Lucchini Sidermeccanica pudo obtener desde el tamaño fijado un número proporcionado del contenido de inclusiones del acero, y este número examinarlo con los valores esperados, es un buen valor informativo para controlar el proceso y hacer continuas mejoras de la micro-limpieza del producto.

La medida del grado de pureza en los diferentes periodos de la producción R7T se representa. La tendencia del ratio de las inclusiones no metálicas desde el tamaño (0) Método K DIN 50 602 es la dirección correcta. De hecho, la media del valor  $K(0)$  fue sobre los 33 en 1986, 27 en 1996 y 18 en 2006. Además, la media del valor  $K(1)$  fue 19 en 1986, 16 en 1996 y 11 en 2006. Se puede ver que  $K(4)$  es cero en las dos últimas décadas. Si se profundiza en los valores, queda claro que la micro-limpieza se ha mejorado, gracias a la reducción de sulfatos y óxidos, debido a la capacidad de desulfuración y desoxidación de los nuevos aparatos de fabricación de aceros. Viendo la tendencia de los residuos en las R7T. La media de los valores del contenido en S en la producción de R7T fue:  $S = 0.012\%$  en 1986,  $S = 0.010\%$  en 1996 y  $S = 0.002\%$  en 2006. La tendencia del contenido de Mo es un interesante indicador de la variación en el análisis químico, para obtener los valores deseados de dureza.

La desoxidación se ha mejorado, como se demuestra por la tendencia del contenido de Al y Ti; en particular el contenido de Ti ha descendido, porque hay evidencias metalúrgicas del efectos negativos en la rigidez a fractura de los nitritos de titanio. Se puede tener una idea sobre la tendencia de los gases en los tres mencionados procesos, con una reducción significativa de  $N_2$ ,  $O_2$  y  $H_2$  que se relaciona con la tendencia de la micro-limpieza de la Fig. 20. Si se representan los valores de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  frente a la media de la micro-limpieza  $K(0)$  DIN 50 602, se puede obtener las graficas de la Fig. 23 a-b, que pone en evidencia que están relacionados buenas micro-limpiezas con buenas rigideces a fractura.

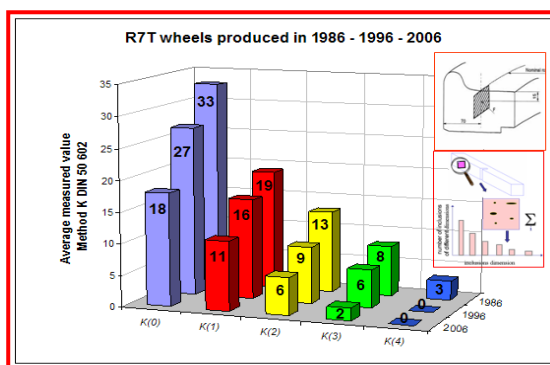


FIGURA 4.6.XII RUEDAS PRODUCIDAS DESDE 1986

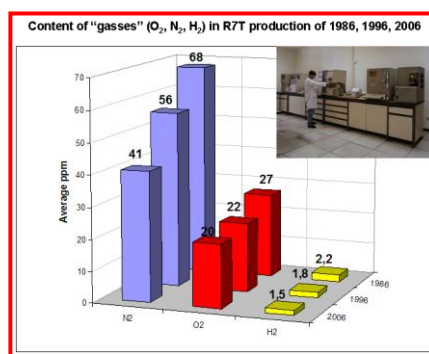
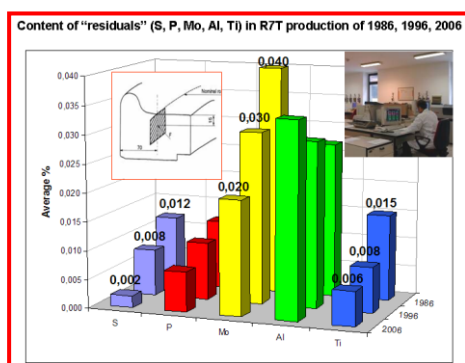


FIGURA 4.6.XIII CONTENIDO DE GASES EN RUEDAS

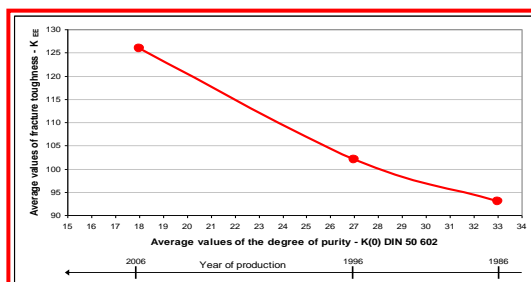
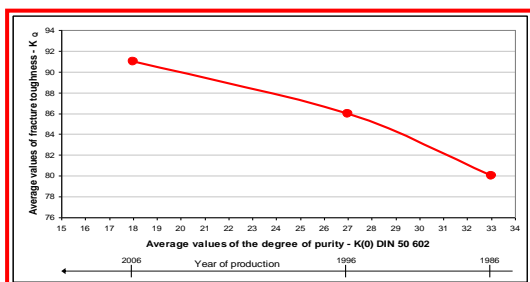


FIGURA 4.6.XIV VALORES DE  $K_Q$  Y  $K_{EE}$  FRENTE A MICROLIMPIEZA

El continuo desarrollo de nuevos procesos constituye el reto más importante de los fabricantes de material rodante. La tecnología necesitada por los ingenieros de ruedas de ferrocarriles y fabricantes es muy compleja y cara, porque necesita muchas investigaciones para la instalación y control de los equipos dedicados para los nuevos procesos y productos investigados y en desarrollo. El proceso integrado de fabricación es lo que garantiza la obtención de componentes los cuales deben probar más facilidad y seguridad en el trabajo.

La experiencia ganada por Lucchini Sidermeccanica en el campo de los materiales rodantes ha probado que, por optimización del proceso de fabricación en una única unidad de producción integrada, es posible obtener excelentes resultados, en términos de fiabilidad y seguridad en el producto final. Para mejorar los valores de rigidez y homogeneidad en ruedas, los siguientes aspectos del proceso se tienen que tener en cuenta:

- Diseño del material, en términos del análisis químico y tratamiento térmico
- Proceso de fundación.
- Procesos de tajamientos térmicos.

Un diseño preliminar metalúrgico del grado del acero en términos del análisis químico y tratamiento térmico es el paso más importante; esta actividad tiene que ser controlada y mejorada en relación a las curvas CCT influenciadas de los contenidos de los “residuos” y con la mejora del proceso de fundición y de los tratamientos térmicos. La determinación experimental de las propiedades de la rigidez a fractura es sin duda uno de los más importantes aspectos en la caracterización de la ruedas, para prevenir la fractura frágil, incluso si los estudios del fenómeno principal de la mecánica de la fractura desde el punto de vista macroscópico; intentan establecer el criterio ingenieril de predecir las condiciones de extensión inestable de la fisura, sin mirara dentro de la fisura y sus superficies. Muchos criterios están basados en la teoría de la elasticidad. Entonces, No se puede tener en cuenta lo que ocurre al tiempo de la iniciación del fallo a nivel microscópico. Por estas razones, la importancia fundamental de relacionar los

parámetros microestructurales con la rigidez a fractura, para mejorar el proceso de fabricación del acero de la ruedas.

En el caso de las ruedas R7T con diferentes valores de rigidez a fractura investigaciones exhaustivas se han realizado por Lucchini Sidermeccanica para relacionar rigidez a fractura con parámetros microestructurales. Se ha observado que:

- Niveles altos de rigidez a fractura corresponden a micro inclusions y a una micro-estructura
- Bajos valores de rigidez a fractura corresponden a micro inclusiones y una micro-estructura

Es fácil notar los diferentes grados de micro-limpieza en los dos casos. El acero de las ruedas en la izquierda fue fabricado conforme a la fabricación que incluía un degaseado y refino con fuertes desulfuraciones. Las ruedas de la derecha, cumplen con las normativas UIC y EN, fabricadas en una caldera eléctrica con un proceso de fabricación de refino y suave desulfuración. Las dimensiones secundarias del grano y del grado de micro-homogeneidad y estructura son muy diferentes en los dos casos. De este modo, hay que tener especial atención en el proceso de fabricación del acero para obtener un buen nivel de micro-limpieza, y en los procedimientos de los tratamientos térmicos, entonces se obtendrán estructuras apropiadas y homogéneas y apropiados niveles de tensiones internas. Gracias a las 90000 medidas recogidas en la base de datos durante los últimos 15 años,  $K_{EE}$  combinada con  $K_Q$  y con el control de la micro-limpieza y micro-estructura, puede ser fácilmente usadas para definir un criterio ampliamente aceptado durante la inspección del material [26].

Gracias a estos resultados se puede resaltar la tendencia en la producción del acero R7Te introducir otro indice de calidad para el proceso de la fabricación como es el producto del limite elastic (YS) con la rigidez a fractura  $K_Q$  ( $YS \times K_Q$ ). En resumen y para dar una idea de la tendencia recogida de los resultados en dos periodos diferentes (1996 y 2006) se representan en la siguiente gráfica. La posición de estos resultados en

la grafica demuestra que en la producción de Lucchini Sidermeccanica de los aceros R7T se ha obtenido una gran mejora.

Los resultados en la producción de los R7T, controlados durante mucho tiempo confirman que se garantizan altos y homogéneos valores de las características mecánicas y rigideces al mismo tiempo; esto es muy importante resultado representativo que Lucchini Sidermeccanica ha conseguido en la calidad y seguridad de su producto con el objetivo de seguir mejorando.

La seguridad puede ser mejorada, si se puede introducir estos indicadores de caracterización del material rodante, como todas las características relevantes del servicio no son consideradas en las normativas. Lucchini Sidermeccanica son pioneros de la mejora y la innovación de los aceros, conforme a esos criterios.

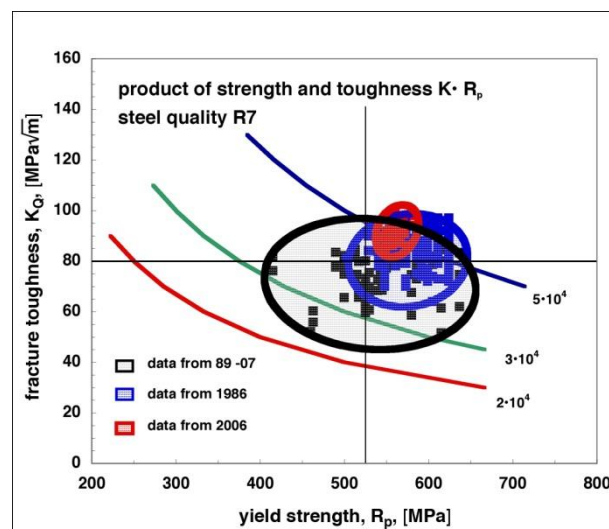


FIGURA 4.6 XV –LOCALIZACION DE LA PRODUCCION SEGÚN EL AÑO

## 5. LA VIA



## 5.1 INTRODUCCIÓN

La definición clásica de la vía ferroviaria incluye, no solo lo que denominamos camino de rodadura sino además las instalaciones necesarias para la explotación como es la electrificación, señalización, etc....

Se elegirá un concepto mucho más restringido de la vía ferroviaria distinguiendo dentro del camino de rodadura dos partes diferenciadas:

**INFRAESTRUCTURA:** Conjunto de obras necesarias para construir la plataforma, como puede ser terraplenes, puentes, etc.

**SUPERESTRUCTURA:** Conjunto de elementos que transmiten las cargas a la explanación y sobre los que directamente se realiza la circulación del material móvil.

A esta segunda parte estará referida a partir de ahora la definición de vía ferroviaria. Una definición más concreta es de la vía ferroviaria es el conjunto de elementos con módulos de elasticidad y coeficientes de amortiguación variables dispuestos sobre la plataforma con objeto de recibir, amortiguar y transmitir las cargas producidas por la circulación de vehículos ferroviarios.



## 5.2. PARTES

La composición de la vía ferroviaria está compuesta por

**CARRILES:** Piezas metálicas dispuestas en sentido longitudinal según el sentido de la marcha y sobre la que se realiza la rodadura de los vehículos guiándolos y recibiendo directamente los esfuerzos producidos por estos

**TRAVIESAS:** Piezas transversales dispuestas bajo los carriles que rigidizan el conjunto y transmiten y reparten las cargas recibidas por el carril

**CAPAS DE ASIENTO:** Capas de espesor uniforme sobre las que apoyan las traviesas y que amortigüen y reparten lo mas uniformemente posible los esfuerzos a la plataforma. Hay dos tipos de principales de asiento: balasto, que un lecho de material incompresible que forman la capa de asiento, y en placa, que es una placa rígida de asfalto u hormigón sobre las que se colocan las traviesas.

A estos elementos habría que añadir el denominado pequeño material entre el que se incluye placas de asiento, bridas, sujeciones, etc. [\[29\]](#)

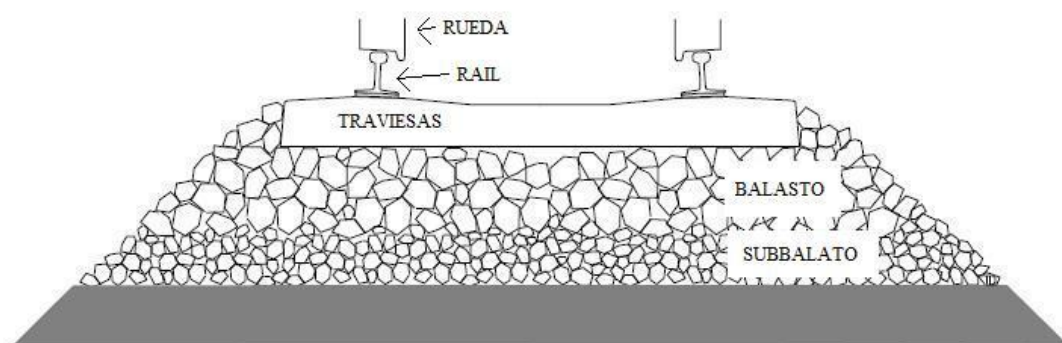


FIG. 5.2.1- ESQUEMA DE LA COMPOSICION DE LA VIA -

## 5.3 CALCULO DE LA VIA

### 5.3.1 Esfuerzos

#### 5.3.1.1 Verticales

La carga estática de las ruedas en un tren es conocida pero sufre variaciones por:

- Desigual reparto del peso de un eje entre las ruedas como consecuencia de la fuerza centrífuga no compensada en una curva.
- Variación en el reparto por desnivelación de la vía o por irregularidades en la suspensión del material.
- Sacudida que se producen en la masa no suspendida de los vehículo por irregularidades en la vía
- Sacudidas producidas por defectos en el material rodante como planos u ovalaciones.
- Esfuerzo debidos a la inercia de las piezas ligadas al movimiento de las ruedas.

Los esfuerzo verticales son pues susceptibles de rebasar ampliamente la carga estática de las ruedas pudiendo incluso duplicar el valor de esta

### 5.3.1.2 TRANSVERSALES

Estos esfuerzos se aplican en cabeza de carril actuando sobre sujeciones y produciendo desperfectos en la vía. Obligan a trabajar a la vía en su dirección más desfavorable originando un esfuerzo desigual sobre el balasto.

- Fuerzas centrípeta dependiendo de la velocidad de circulación en la curva y el peralte
- En recta producido por el movimiento de lazo amplificado por defectos en locomotora, material móvil y de la vía.

### 5.3.1.3 LONGITUDINALES

- Dilatación
- Golpes en juntas
- Frenado y acelerado del vehículo
- Rozamiento pestaña-carril
- Deslizamiento de la llanta interior en curva a causa del recorrido menor que efectúa
- Esfuerzo de arranque

## 5.3 EL CARRIL

### 5.3.1. INTRODUCCION

El carril es el elemento que mejor caracteriza y distingue el transporte ferroviario, al que aporta su propio nombre. Es un componente esencial de la superestructura ferroviaria y cualquier defecto sustancial en el mismo se traduce en un grave accidente o al menos en una dificultad importante para la circulación. Es pues imprescindible asegurar su calidad y su correcta conservación lo que implica un análisis sistemático y continuo sobre sus defectos y desgastes. [30]

### 5.3.2. FUNCIONES DEL CARRIL

Las funciones del carril son las siguientes:

- Absorber, resistir y transmitir a las traviesas los esfuerzos recibidos del material motor y móvil así como los de origen térmico.
- Guiar el material circulante con continuidad tanto en planta como alzado
- Servir de elemento conductor para el retorno de la corriente en las líneas explotadas en tracción eléctrica
- Servir de conductor para las corrientes de señalización

### 5.3.3. PERFILES DEL CARRIL

Los primeros carriles tenían un perfil en doble T diseñado que correspondía a la función resistente del carril y al propósito de una posible reversibilidad. Este diseño se abandono en los años 30.

En la actualidad las distintas redes ferroviarias utilizan el denominado carril Vignole ideado por el americano Stevens e introducido en Europa en 1836 por Charles Vignole.

La forma de este perfil que permite una fácil sujeción a las traviesas esta muy condicionada a la necesaria conexión entre carriles lo que origina que ciertos detalles de diseño no sean siempre los óptimos desde el punto de vista de la resistencia ante los esfuerzos que debe soportar.

Las tres partes del perfil son

**CABEZA**

**ALMA**

**PATIN**



Un reparto adecuado según estudios fotoelasticidad es para la cabeza de 35 a 40 %, el alma de 22 a 27 % y para el patín unos 38 %

#### 5.3.3.1 CABEZA

La cabeza es la parte del carril destinado a entrar en contacto con las llantas de material móvil.[31]

La anchura debe ser suficiente para:

- Mantener un efecto de reparto de cargas en las zonas donde se producen las tensiones para el contacto carril-llanta y que deben transferirse a la cabeza.
- Permitir radio de acuerdo adecuados con el alma y la cabeza dejando margen para la colocación de las bridas
- Mantener un margen para el desgaste lateral en curvas de radio reducido.

Como regla general debe estar comprendida entre 60 y 72mm. Si el ancho es mayor se produce un mal reparto de la masa metálica y los puntos de aplicación pueden desconcentrarse excesivamente. [32]

La altura debe tener en cuenta la plasticidad superficial. Los efectos plásticos se agravan y hay que dimensionar la altura del carril para evitar que un desgaste acelerado obligue a una renovación prematura del mismo. Empíricamente se ha demostrado que una cabeza de 50mm mantiene un buen equilibrio con las otras partes del carril.

El radio de curvatura del carril se denomina Bombeo. El bombeo influye cuantitativamente en las tensiones superficiales. Los valores del bombeo varían entre 200mm a 500mm. El valor óptimo es de 300mm

Inclinación de las caras laterales debe evitar que haya contacto con las pestañas de la llanta en recta pero para que en curva las tensiones se reduzcan. El contacto debe ser con la mayor superficie posible, esta exigencia es contradictoria adoptándose una solución de compromiso que consiste en proporcionar una inclinación hacia el exterior de 1:20 que proporciona una anchura mayor y facilita la colocación de las bridas de unión.

La inclinación de las caras inferiores está comprendida entre  $1/3$  y  $1/4$  porque valores menores que hacen dificultoso el radio de acuerdo con el alma.

La anchura del carril debe cumplir las siguientes exigencias:

- Evitar la concentración de la acción de llantas en zonas muy limitadas.
- Limitar en lo posible la tendencia del material a extenderse.
- Soportar por mucho tiempo el desgaste.

La anchura está comprendida entre 60 y 70mm

### 5.3.3.2 PATIN

La anchura condiciona la rigidez en el plano horizontal y su resistencia al vuelco. El valor normal es  $1.1 b < h < 1.2 b$ . Siendo  $h$  el canto del carril.

El espesor y la forma de las alas vienen condicionados en parte por el laminado y en parte por el equilibrio de masas entre cabeza alma y patín, la inclinación escalonada facilita el trabajo de bridas y uniones y el material

### 5.3.3.3. EL ALMA

Se caracteriza por un espesor que debe resistir los esfuerzos cortantes, la corrosión y las tensiones que se presentan en las proximidades de los agujeros de las bridas.

- Límite inferior 16mm
- Radio de acuerdo alma-patín 15-35mm con valores menores se crean concentraciones de tensiones y fisuración con radios mayores habría poca superficie de contacto de bridas.



#### 5.4.4 DESGASTE DE LOS CARRILES

El carril está sometido a diferentes acciones procedentes del material rodante que causan en el carril desgastes y averías. Las causas principales del desgaste de carriles son las siguientes:

- Trazado y perfil de la línea.
- Estructura de la vía y estado de la conversación.
- Peso, velocidad y características de los vehículos.
- Deslizamiento rueda-carril.
- Composición química y tratamiento del carril.
- Perfiles de la rueda y el carril.
- Régimen de circulación de trenes.

Las clases de desgaste varían entre:

- **Vertical:** abrasión de las ruedas y corrosión.
- **Lateral:** En recta por oscilaciones del material rodante. En curva por la entrada en contacto de la pestaña de la rueda con el plano del carril.
- **Deformación plástica:** Aplastamiento de la capa de rodadura por la acción del material rodante.
- **Corrosión:** Producida por agentes atmosféricos, es mayor en túneles, inicialmente es muy rápida y más lenta después.

- **Desgaste inferior de la cabeza:** Solo en barras embridadas por la acción brida-carril.
- **Ondulatorio:** En sentido longitudinal en forma de onda con longitud de 30 a 80mm. Produce averías en el material rodante.

### 5.4.5 ACERO DE LOS CARRILES

La UIC ha definido una regla para elegir la resistencia del acero que debe utilizarse en función del tráfico y del radio de las curvas. La resistencia a tracción es en realidad de 950 a 970 N/mm<sup>2</sup>. Para curvas de R<300m utilizan aceros de hasta 1300 N/mm<sup>2</sup> que tienen contenidos más altos de Cr, Si y V.

CARRIL	RESISTENCIA A TRACCION (N/mm <sup>2</sup> )	ALARGAMIENTO %
CARRIL NORMAL	685 - 835	14
CARRIL DURO	> 885	10

TABLA 5.4.I – PROPIEDADES CARRIL -

La influencia de cada elemento es:

- **Carbono:** Aumenta la resistencia a tracción pero lo fragiliza.
- **Manganeso:** Aumenta la resistencia a tracción y al desgaste. Mejora la tenacidad.
- **Silicio:** Igual que al carbono. Además facilita la eliminación de gases durante la elaboración del acero.
- **Cromo:** Aumenta la resistencia pero favorece la formación de martensita con lo que fragiliza

- **Fósforo y azufre:** Hacen que el metal sea frágil y propicio a rotura por lo que hay que eliminarlos

COMPONENTES	ACERO AL OXIGENO	ACERO NATURALMENTE DURO
<b>C</b>	0,37 – 0,55 %	0,6 – 0,8 %
<b>Mn</b>	0,7 – 1,2 %	0,8 – 1,3 %
<b>Si</b>	< 0,35 %	0,1 – 0,5 %
<b>P</b>	< 0,04 %	< 0,03 %
<b>S</b>	< 0,04 %	< 0,03 %

TABLA 5.4.II- COMPONENTES CARRIL -

## 5.5 TRAVIESAS

### 5.5.1 INTRODUCCION

Elementos de diversos materiales que situados en dirección transversal al eje de la vía sirve de sostenimiento al carril constituyendo el nexo de unión entre el y el balasto.

### 5.5.2 FUNCIONES

Las funciones que cumple la traviesa son las siguientes

- Transmisión de cargas del carril al balasto y reparto de dichas cargas.
- Asegurar el ancho de vía sin alteraciones temporales.

- Facilitar el asiento del carril con su inclinación de 1/20 hacia el interior para mejorar la estabilidad y facilitar la rodadura y el girado de las ruedas troncocónicas.
- Evitar la conducción eléctrica respecto de la corriente de tracción dificultando la aparición de corrientes parasitarias en los circuitos de vía.

### **5.5.3 TIPOS**

#### **5.5.3.1. MADERA**

Las ventajas de estas traviesas son las siguientes: flexibilidad y resistencia a flexión, buen coeficiente de aislamiento eléctrico, efectuar el cajado de apoyo al carril y buen comportamiento a descarrilo.

Los inconvenientes son: menor vida que las de hormigón y no se puede usar en alta velocidad.

#### **5.5.3.2 METALICAS**

Se fabrican a partir de un perfil en U invertida embutida en sus extremos para formar unos topes que se clavan al balasto para aumentar la resistencia al desplazamiento lateral.

Las ventajas son: muy ligeras, fáciles de poner, absorbe bien los esfuerzos y facil almacenamiento. [33]

Las desventajas son: muy ruidosa, no se puede usar en alta velocidad, necesita nivelación continua y difícil aislamiento eléctrico.

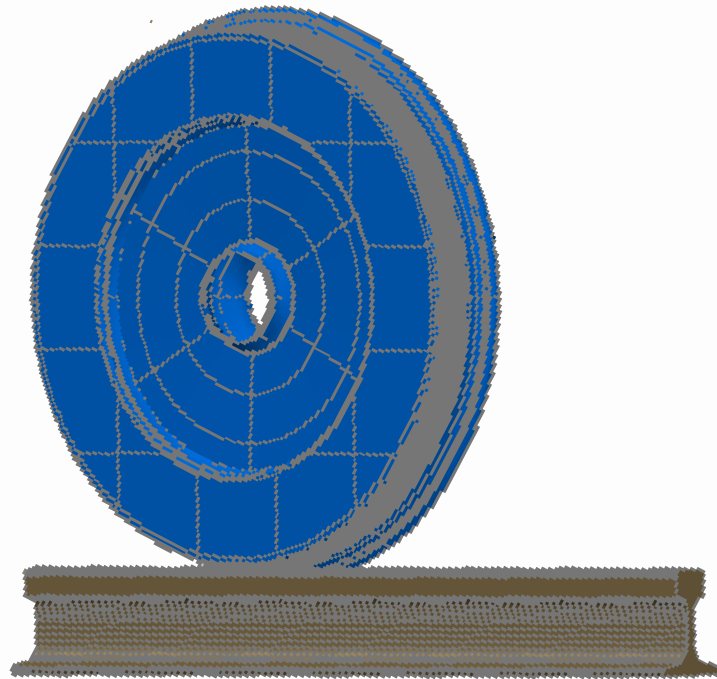
### **5.5.3.2 HORMIGON**

Las ventajas son: duración elevada, condiciones físicas constantes y resistencia a los desplazamientos.

Las desventajas: mayor coste, mayor peso, mayor dificultad de aislamiento eléctrico y facilidad de fisuración en su zona central.

RENFE utiliza este tipo unida por una riostra metálica, esta se le denomina RS. También se puede utilizar el hormigón con armaduras pretensadas.

# **6 TEORIA DE CONTACTO RUEDA-CARRIL**



## 6.1 INTRODUCCION

Durante más de 150 años, el sistema rueda carril ha proporcionado un alto grado de seguridad en el transporte. El grado de fiabilidad es tan alto que el mecanismo de funcionamiento ha sido obviado considerándolo como un simple pseudodeslizamiento por la mayoría de la gente.

Sin embargo, desde un punto de vista de ingeniero esto puede entenderse de manera diferente, especialmente si tenemos en cuenta la responsabilidad que supone la red de ferrocarriles. El contacto rueda-carril es una unión compleja e imperfecta. Primero, es un lugar en el que se concentran muchas tensiones. El perfil cónico de la rueda permite la diferencia de velocidad en curvas, limitado por la longitud transversal de la vía, donde las superficies prácticamente deslizan. Las superficies de contacto son muy similares a las que se producen en los rodamientos pero sin la protección contra la suciedad, lluvia, arena o incluso piedras de balasto.

Aproximándonos un poco más, la seguridad puede permanecer a un nivel alto mientras se mantengan ciertas precauciones.

Históricamente, el primer modelo teórico de la fuerza longitudinal de contacto rueda-carril la hizo Carter en los EEUU. Más recientemente, Johnson (en el Reino Unido) y Kalker (en Holanda) sentaron las bases para una descripción más precisa.

En paralelo, diseñadores de programas dinámicos decidieron modelar un contacto rueda-carril primero con una conicidad constante y limitado por las dos pestañas a los lados. Luego se tuvo en cuenta una conicidad variable por el efecto combinado de la fuerza centrífuga y un contacto a saltos. El contacto a saltos es un parámetro complejo de simular a la hora de calcular las fuerzas en las ruedas y es uno de los factores principales para la descripción del contacto como si no fuera Hertziano. Pero el primer paso será considerar el contacto rueda-carril como si fuera Hertziano.

[\[14\]](#)



## 6.2 MODELO BÁSICO DEL EJE MONTADO – CARRIL.

Considerando la vía como rígida, la rueda de ferrocarril tendrá dos grados de libertad:

- El desplazamiento lateral.
- El ángulo de giro,  $\alpha$ .

Cuando el comportamiento del eje montado es inestable, la combinación de los grados de libertad se denomina movimiento de lazo. Tanto el desplazamiento lateral como el ángulo de giro pueden ser tratados como desplazamientos respecto a la vía. El juego lateral entre las dos pestañas es de  $\pm 8\text{mm}$ .

Los otros grados de libertad están restringidos, tanto el desplazamiento a lo largo del eje  $x$  como la rotación sobre el eje  $y$ , “ $\omega$ ”, están determinados por la velocidad longitudinal  $V_x$  y el radio de giro de la rueda  $r_0$  siendo  $V_x = \omega r_0$ . La altura del centro de gravedad del eje montado está al nivel del raíl cuando se produce contacto en los dos raíles.

El eje montado está básicamente compuesto por dos ruedas cónicas, prácticamente ruedas cilíndricas, encajadas a presión en el eje. Cada rueda está equipada por una pestaña, cuya función es la de prevenir el descarrilamiento y guiar al vehículo. En línea recta las pestañas nunca entran en contacto pero la unión rígida entre las dos ruedas demuestra que el eje montado del ferrocarril está diseñado para ir en línea recta y que únicamente se producirá el contacto en la pestaña en las curvas. A esto se le denomina bicono ferroviario.

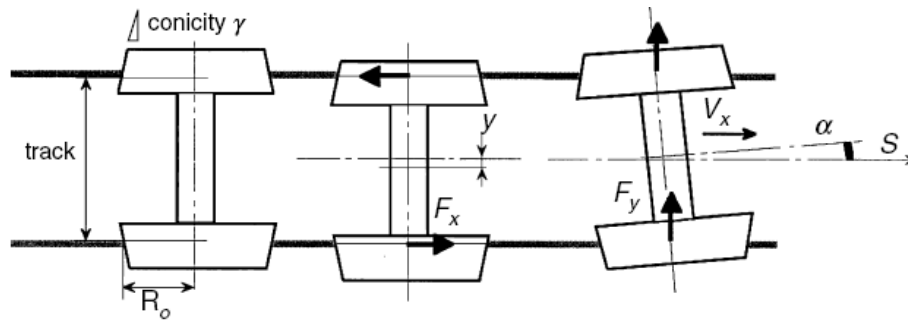


FIGURA 6.2.I – MODELO EJE MONTADO-

La zona de contacto entre la rueda y el raíl es una pequeña área horizontal. La presión de contacto en esta pequeña superficie se puede considerar una zona de concentración de tensiones comparando los esfuerzos en el resto del conjunto. El centro de esta superficie es también un punto de aplicación de fuerzas verticales, esfuerzo cortantes y longitudinales. El conocimiento de estas fuerzas es necesario para determinar el equilibrio y el comportamiento dinámico.

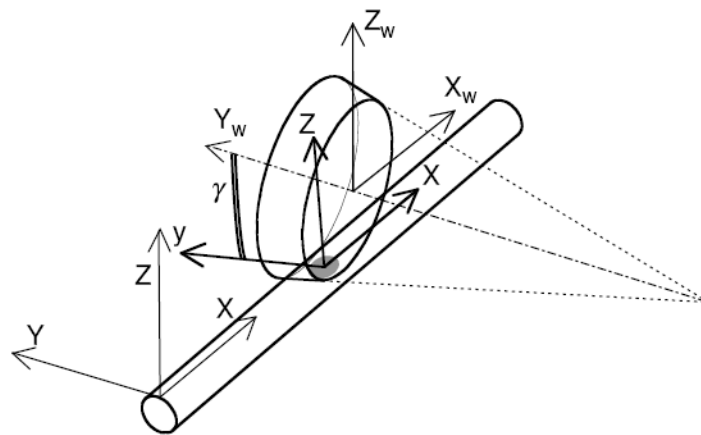


FIGURA 6.2.II – ZONA CONTACTO-

Para poder determinar este comportamiento y estas fuerzas, lo primero que se deben calcular son los parámetros de contacto: la superficie de contacto, la presión y el esfuerzo cortante. Cuando los materiales de dos sólidos en rodadura tienen características elásticas idénticas el problema normal es independiente del problema tangencial. Para realizar este cálculo se suele dividir el problema en dos diferenciados:

- Cálculo de las fuerzas normales a la superficie (basado en la teoría de Hertz).
- El cálculo de las fuerzas tangenciales a la superficie (basado en la teoría de Kalker).

## 6.3 CONTACTO NORMAL HERTZIANO

### 6.3.1 METODO DE CÁLCULO

El estudio de dos superficies en contacto es posible actualmente gracias al uso de los programas de elementos finitos. Sin embargo, la necesidad de obtener los resultados lo antes posible en códigos dinámicos hace que también sean útiles los métodos analíticos. En esta sección se describe primero el método tradicional, método Hertziano, ampliado mediante una serie de consideraciones cuyo objetivo es hacer el cálculo más rápido.

Hertz demostró que cuando dos cuerpos elásticos presionan el uno contra el otro en las siguientes condiciones:

- Comportamiento elástico.
- Espacios semi-infinitos.
- Curvatura del radio mucho más grande que el área de contacto.
- Curvatura constante dentro de la zona de contacto.

Entonces:

- La superficie de contacto es una elipse.

- La superficie de contacto se considera plana.
- La presión de contacto es una semi-elipsoide.

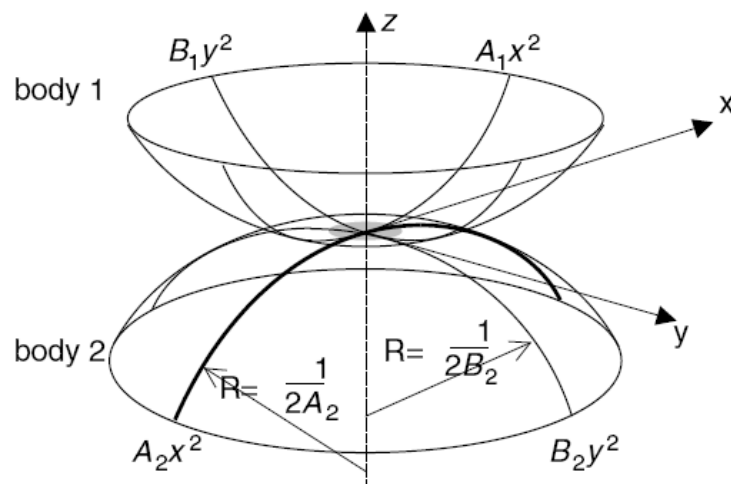


FIGURA 6.3.I -RADIO TRANSVERSAL O CURVATURA-

Es imprescindible conocer las curvaturas principales de los dos semiespacios para el cálculo de la dimensión de la superficie y la presión de distribución. En el caso del ferrocarril, las cuatro curvaturas principales se pueden considerar que se encuentran en planos perpendiculares; sus direcciones se corresponden con los ejes principales del plano xy.[34]

Considerando los dos cuerpos elásticos en contacto, se unirán en un solo punto 0 donde la distancia normal entre ellos sea mínima. Cerca del punto de contacto, sin carga, los contornos de las dos superficies se pueden representar por dos polinomios de orden 2:

$$z_1 = A_1x^2 + B_1y^2$$

$$z_2 = A_2x^2 + B_2y^2$$

Los coeficientes  $A_{1,2}$  y  $B_{1,2}$  se asumen que son constantes en la zona cercana al punto de contacto O y que está unida a la curva local principal por la segunda expresión diferencial, la primera se omite dentro del plano de contacto.

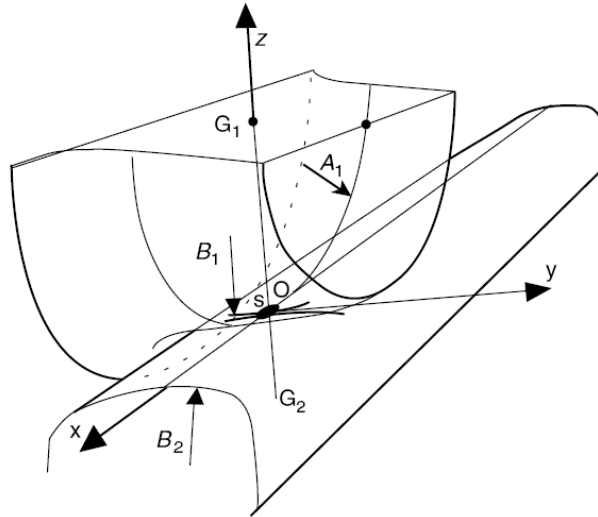


FIGURA 6.3.II- CURVATURAS RUEDA-

Estos a partir de todo el documento serán los ejes de referencia para calcular las tensiones que sufre.

Para el caso del ferrocarril la curvatura y el radio se toman como:

**Rueda**

$$\frac{d^2 z_1}{dx^2} = 2A_1 \approx \frac{1}{r_n}$$

$$\frac{d^2 z_1}{dy^2} = 2B_1 \approx \frac{1}{R_{wx}}$$

**Carril**

$$\frac{d^2 z_2}{dy^2} = 2B_2 \approx \frac{1}{R_{rx}}$$

La curvatura  $A_2$  se omite como si se tratase de un radio infinito.  $B_1$ ,  $B_2$  y  $A$  se deducen del perfil transversal,  $A$  se determina de  $r_n$ , del radio normal de la rueda que se deduce de  $r_0$ , el radio de giro de la rueda.

### 6.3.2 RELACION DE A/B CON b/a

Antes de que se aplique la carga, la distancia relativa vertical  $d(x,y)$  entre los dos cuerpos se puede escribir:

$$z_1 + z_2 = d = Ax^2 + By^2$$

$$A = \frac{1}{2r_n} \text{ and } B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{wx}} + \frac{1}{R_{rx}} \right)$$

siendo  $A$  y  $B$  siempre positivos.

Convencionalmente, “a” es una elipse longitudinal cuyo semieje en la dirección  $x$  es  $b$  está en la dirección transversal, eje  $y$ . Los radios  $A/B$  y  $b/a$  varían de la misma manera: si  $A > B$ , entonces  $b > a$ . Si se igualan  $a=b$  el contacto es circular.

### 6.3.3 CALCULO SEMIEJES.

El cálculo tradicional está basado en la determinación del semieje de radio función de  $B/A$  usando un parámetro intermedio, el ángulo  $\theta$  definido como:

$$\cos \theta = \frac{|B - A|}{B + A}$$

Los valores más prácticos para los semiejes a y b, la distancia reducida entre los dos cuerpos viene dado por:

$$a := m_a \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2) \cdot \text{Normal}}{4 \cdot E \cdot (A1 + B1)}}$$

$$b := n_b \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2) \cdot \text{Normal}}{4 \cdot E \cdot (A1 + B1)}}$$

Con E como módulo de Young y  $\nu$  el coeficiente de Poisson, asumiendo el mismo tipo de material tanto para el raíl como para la rueda. m y n son coeficientes adimensionales que están en función del ángulo  $\theta$ . En la siguiente tabla se muestran los valores de m y n en función de  $\theta$ . En el caso de que el ángulo  $\theta$  sea mayor que 90, se intercambian los valores de m y n.

$\theta$ (deg)	m	n	$\theta$	m	n	$\theta$	m	n
<b>0.5</b>	61.4	0.1018	<b>10</b>	6.604	0.3112	<b>60</b>	1.486	0.717
<b>1</b>	36.86	0.1314	<b>20</b>	3.813	0.4123	<b>65</b>	1.378	0.759
<b>1.5</b>	27.48	0.1522	<b>30</b>	2.731	0.493	<b>70</b>	1.284	0.802
<b>2</b>	22.26	0.1691	<b>35</b>	2.397	0.530	<b>75</b>	1.202	0.846
<b>3</b>	16.5	0.1964	<b>40</b>	2.136	0.567	<b>80</b>	1.128	0.893
<b>4</b>	13.31	0.2188	<b>45</b>	1.926	0.604	<b>85</b>	1.061	0.944
<b>6</b>	9.79	0.2552	<b>50</b>	1.754	0.641	<b>90</b>	1	1
<b>8</b>	7.86	0.285	<b>55</b>	1.611	0.678			

TABLA 6.3.I- COEFICIENTES M,N Y  $\theta$  DE HERTZ

A es la superficie del área de la elipse y se expresa mediante la siguiente función  $\pi ab$



### **6.3.4 CONCAVIDAD, CONVEXIDAD Y SIGNO DE RADIO**

El signo del cada radio es importante porque en uno de los métodos de cálculo se usa  $A - B$  mientras que en el otro  $A + B$  valores que determinan el borde de la elipse. Cada radio es positivo si el centro de curvatura está en su interior, en la mayor parte de las ocasiones tanto el radio de longitudinal como el radio transversal del carril son positivos (convexos). Pero el radio de la rueda puede ser positivo (convexo) o negativo (cóncavo).

### **6.3.4 PRESION DE CONTACTO**

Este valor está por encima del límite elástico de la mayoría de los aceros, pero el estado de compresión es más complicado que el considerado en estas aproximaciones, y por eso el límite elástico no se alcanza. La determinación del límite plástico (límite impuesto por la hipótesis de Hertz) puede ser calculado utilizando como criterio base la tensión hidrostática (Von Mises).

### **6.3.5. APLICACIÓN AL CAMPO DE FERROCARRIL.**

#### **6.3.5.1 POSICION DE CONTACTO**

Cuando la rueda es perfectamente cónica, la zona de contacto en el carril parece ser un punto con la misma pendiente que la rueda, medido en el plano YZ.

Para una rueda cónica perfecta de 1:20 y con unos raíles nuevos inclinados a 1:20 se produce el punto de contacto en la mitad del carril.

#### 6.3.5.2 CONICIDAD

Existe un gran número de perfiles de rueda para los cuales no se sabe describir el contacto entre la rueda y el raíl durante la mayor parte del tiempo, ya que el contacto no se produce en la parte cónica de la rueda. Sin embargo, el factor más importante a considerar es la conicidad. Su cálculo debe considerar el perfil de la rueda pero también el perfil del raíl y el carril de la pestaña.

#### 6.3.5.3 CARGA NORMAL

Durante la marcha, con una conicidad pequeña, la carga normal  $N$  tiene prácticamente el mismo valor que la carga vertical en la rueda, por ejemplo con un ángulo cónico de 1:20:

$$N = Q \cos(\text{atan}(0.05)) = 0.9988 Q$$

Pero se necesita un sistema de ejes de referencia diferente:  $z$  para el eje normal y  $x, y$  para las direcciones tangentes.

#### 6.3.5.4 DETERMINACION LONGITUDINAL DEL RADIO DE LA RUEDA

Esta curvatura se le denomina “longitudinal” porque el círculo rodante de una rueda cilíndrica estaría en el plano XZ. Sin embargo, la rueda es generalmente cónica, el

ángulo de contacto  $\gamma$  no es cero, el coeficiente  $A_1$  de curvatura en el plano XZ no es el mismo que el ángulo de giro  $r_0$ . La intersección entre XZ y el cono de la rueda es una elipse con un foco situado en el eje del eje montado y la curvatura del radio es

$$\frac{1}{r_n} = \frac{\cos \gamma}{r_0}$$

El valor  $r_0$  de en el punto de contacto es despreciable frente a este punto y la pestaña, pero esta variación de (+10 hasta +15mm) es de segundo orden comparado con la influencia del  $\cos \gamma$ .

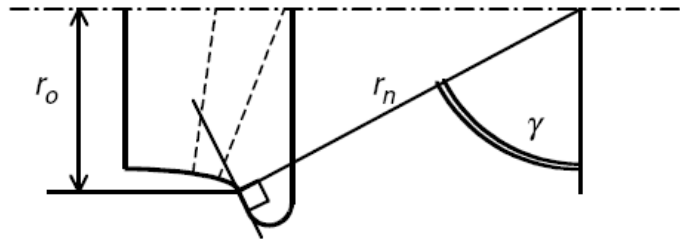


FIGURA 6.3.III CALCULO RADIO LONGITUDINAL RUEDA

#### 6.3.3.5 PUNTO DE CONTACTO ENTRE LOS PERFILES DE RUEDA Y CARRIL

Para determinar el punto de contacto, los perfiles de rueda y de raíl deben estar posicionados relativamente uno frente al otro, el eje montado centrado en la vía como función del ancho del eje montado y el ancho del carril.

El movimiento lateral con la traslación, referido como  $t$  y. En esta posición, en esta posición la distancia mínima entre la rueda y el raíl se define por el punto de contacto O.

En la práctica, la forma del perfil y la suavidad de los movimientos tendrán una gran influencia en el cálculo de la posición del punto de contacto.

B no puede tener un valor negativo. Una comparación simple de las curvas correspondientes da información sobre la posibilidad de tener un centro de contacto Hertziano en esta zona. En la zona de transición en la rueda entre el paso y la pestaña, el contacto es frecuentemente imposible: la suma de las inversas de los radios del eje x debe ser siempre positiva para que exista el contacto.

Pero, si el centro del contacto no puede estar localizado en esta área, puede estar cubierto parcialmente por el contacto de la elipse.

Como primer paso, el estudio de un solo par de contacto rueda-raíl es suficiente para obtener mucha información sobre el contacto, como en función del desplazamiento lateral relativo,  $t_y$ .

Mediante un algoritmo más complejo, se podría también considerar el efecto de giro del otro par rueda-raíl del eje montado, en cuyo caso las tablas son función de  $t_y$  y del giro.

De la misma manera, el ángulo de giro sobre el eje tiene influencia en la posición longitudinal del contacto en la rueda, esto puede ser considerado con la introducción de múltiples parámetros. Generalmente, estos efectos no tienen una gran influencia en el equilibrio del eje montado.

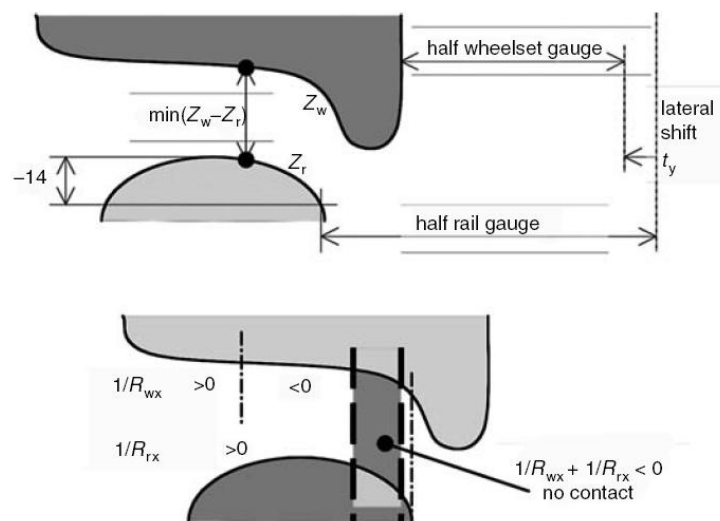


FIGURA 6.3.IV- ZONAS CONTACTO RUEDA

### 6.3.5.6 ZONA DE CONTACTO PARA RUEDA GASTADA

Cuando la rueda sufre desgaste se perderá la inclinación de 1:20 en la banda de rodadura. Al perder dicha inclinación pierde también su conicidad convirtiéndose en un cilindro. Al poder asumir dicha forma cilíndrica, el contacto pasa de ser una elipse a ser un rectángulo, cuyos lados pueden ser considerados iguales a los calculados con la teoría de Hertz. [\[35\]](#)

## 6.4 EL CONTACTO TANGENCIAL.

### 6.4.1 FUERZAS Y MOMENTOS DEL EJE MONTADO

La representación cinemática del eje montado ha sido utilizada, desde hace tiempo, para explicar el comportamiento sinusoidal de un eje montado libre, pero la situación es diferente bajo las condiciones reales de un vehículo.

Un eje montado real está fuertemente supeditado a la flexibilidad de los elementos de suspensión y estas uniones crean fuerzas significativas cuando el eje montado entra en una curva o atraviesa un trazado con irregularidades en el raíl.[\[36\]](#)

Las fuerzas de suspensión producen fuerzas de reacción (normales y tangentes) en el punto de contacto rueda-raíl, donde las componentes tangenciales o fuerzas de arrastre están relacionadas con la velocidad relativa de los dos cuerpos.

Con el sistema de coordenadas de referencia del punto de contacto, las fuerzas se denominan como:

- N para las fuerzas normales.
- $F_x$  para la fuerza longitudinal de pseudodeslizamiento.
- $F_y$  para la fuerza lateral de pseudodeslizamiento en el contacto plano.

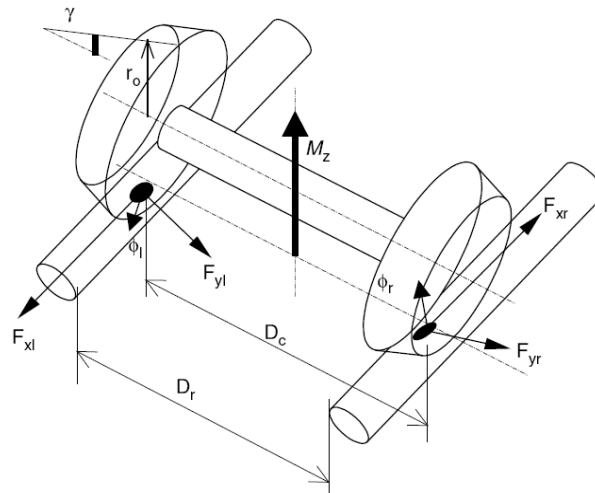
Las fuerzas  $F_y$  deben ser proyectadas sobre el plano OY y sumadas para dar las fuerzas guía.

#### 6.4.1.2 APROXIMACIONES

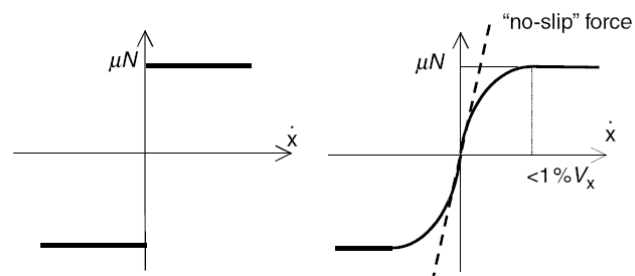
El momento principal ejercido sobre el eje montado sobre el eje Z vienen de las dos fuerzas longitudinales opuestas  $F_x$ , separados lateralmente a una distancia de contacto  $D_c$ :

$$M_z = -\left(F_{xl} \frac{D_c}{2} - F_{xr} \frac{D_c}{2}\right)$$

El pseudodeslizamiento de spin genera un momento alrededor del eje normal al contacto pero se puede despreciar en comparación con el par producido por la fuerza longitudinal  $M_z$ . Sin embrago, el spin genera una fuerza lateral la cual no se puede despreciar cuando el ángulo de contacto es mayor. Esta fuerza lateral se describe separadamente o se incluye en la fuerza del ángulo de giro, dependiendo de la teoría utilizada.



**FIGURA 6.4.I –GEOMERTRIA DEL EJE MONTADO Y SUS FUERZAS**



**FIGURA 6.4.II- MODELO DE COULOMB Y MODELO FRICCION POR RODADURA**

El par tiene una componente resistente del desplazamiento que puede despreciarse en una primera aproximación.



## 6.4.2 FUERZAS TANGENCIALES: MODELOS SIMPLES DE FRICCIÓN A RODADURA.

El contacto rueda carril es un contacto de fricción por rodadura. Se diferencia del modelo de deslizamiento descrito por Coulomb, (el cual se produce en los frenos de zapata), con un área de adhesión y un área pseudodeslizamiento la cual aumenta cuando aumentamos la velocidad de pseudodeslizamiento.

La transición se caracteriza por una pendiente inicial o “fuerza de no pseudodeslizamiento”, la fuerza en caso de que el coeficiente de fricción  $\mu$  fuese infinito y la “S” la curva de saturación.

### 6.4.2.1 ANTECEDENTES HISTORICOS

Después de Hertz, Boussinesq y Cerruti, al comienzo del siglo 20 tres autores estaban interesados por la modelización del contacto rueda-carril: Carter y Fromm en modelos longitudinales y Rocard en fuerzas laterales.

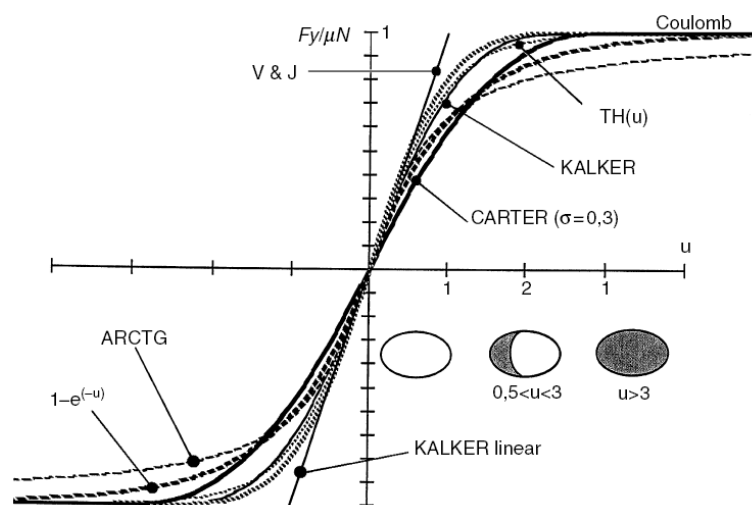


FIGURA 6.4.III- ANTECEDENTES HISTORICOS-

Carter describió una superficie de contacto en 2D pero él fue el primero en dar una expresión adecuada a la fuerza relativa al pseudodeslizamiento en la dirección longitudinal. Su método de descripción de las tensiones en la zona de adhesión. Fue utilizado hasta 1960. Fromm hizo observaciones similares. Rocard describió la relación lineal entre el ángulo de giro y la fuerza guía, tanto para neumáticos como para ruedas de tren en dirección lateral. Él estaba particularmente interesado en el movimiento de lazo.

A partir de 1960 más datos experimentales fueron facilitados y la expresión definitiva fue expresada por Johnson y Kalker los cuales dieron una expresión de la rigidez del pseudodeslizamiento introduciendo coeficientes que dependían de la relación  $b/a$  de la elipse de contacto. Esta expresión es más común hoy.

### 6.4.3 EXPRESIONES LINEALES DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE.

En el caso de contactos Hertzianos, las fuerzas de arrastre son función de las velocidades relativas entre cuerpos rígidos cerca del punto de contacto, los pseudodeslizamientos.

Para la expresión general de fuerzas de arrastre se tienen en cuenta coeficientes de rigidez  $c_{ij}$  expresados en la teoría lineal de Kalker como:

$$F_x = -G abc_{11} v_x$$

$$F_{y_{yaw}} = -G ab c_{22} v_y$$

$$F_{y_{spin}} = G ab c_{23} c\varphi \quad (\text{with } c = \sqrt{ab})$$

Donde  $G$  es el módulo elástico del material (acero en el caso de ferrocarriles);  $\pi_{ab}$  es la superficie de la elipse de contacto; y  $c_{ij}$  son los coeficientes de Kalker.

#### 6.4.4 DEFINICIÓN DE PSEUDODESLIZAMIENTOS.

##### 6.4.4.1 PSEUDODESLIZAMIENTO CUASIESTATICO

Una expresión general para dos cuerpos rodantes puede venir por la proyección de los vectores de velocidad en el eje X, el eje Y y el eje Z:

-Longitudinal	$\nu_x = \frac{\text{proj.}/x(\vec{V}_0 - \vec{V}_1)}{\frac{1}{2}(\vec{V}_0 + \vec{V}_1)}$	(adimensional)
-Lateral	$\nu_y = \frac{\text{proj.}/y(\vec{V}_0 - \vec{V}_1)}{\frac{1}{2}(\vec{V}_0 + \vec{V}_1)}$	(adimensional)
-Rotación	$\varphi = \frac{\text{proj.}/z(\vec{\Omega}_0 - \vec{\Omega}_1)}{\frac{1}{2}(\vec{V}_0 + \vec{V}_1)}$	(1/m)

$V_0$  y  $V_1$  son las velocidades absolutas en el contacto,  $1/2(\vec{V}_0 + \vec{V}_1)$  es la velocidad más significativa.  $\omega_0, \omega_1$  son las velocidades angulares de dos sólidos  $\Omega_i = V_i / r_i$  proyectados sobre la normal al contacto

#### 6.4.4.2 PSEUDODESLIZAMIENTO CUASIESTÁTICO EN FERROCARRILES

La expresión anterior es útil para los cálculos de rigidez, pero para el caso de los ferrocarriles se utilizan simplificaciones.

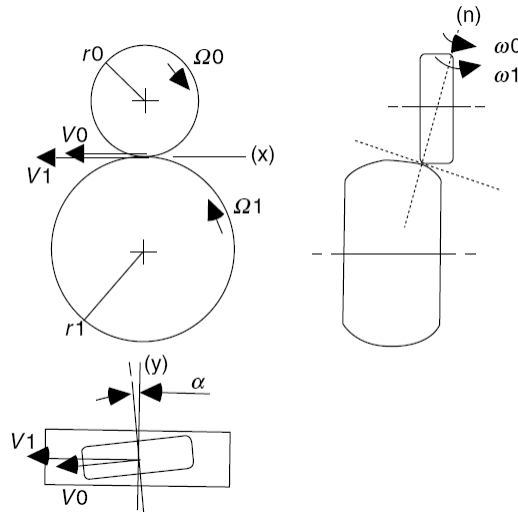


FIGURA 6.4.IV PROYECCIONES VELOCIDADES

#### 6.4.4.3 PSEUDODESLIZAMIENTO LONGITUDINAL

Cuando el eje montado está rodando libremente sin tracción o frenada, debido a la conicidad, los dos radios de giro diferentes  $r_0 \pm \Delta r$  genera dos fuerzas opuestas  $f_x$  y  $-f_x$ ;  $r_0$  es el radio de giro más significativo, el pseudodeslizamiento estático longitudinal puede ser descrito como:

En general en el caso cuasiestático las condiciones con pequeños pseudodeslizamientos,  $V_x \approx r_0 \omega$  y  $1/2(V_x + r\omega \approx V_x)$  entonces para la rueda izquierda (cada uno con su signo respectivo).

$$\nu_{xl} = \frac{V_x - r\omega}{\frac{1}{2}(V_x + r\omega)} \approx \frac{V_x - (r_0 + \Delta r)\omega}{V_x}$$

$$\nu_{xl} = -\Delta r/r_0$$

En el caso de eje montado perfectamente cónico:

$$\Delta r = \gamma y$$

$$\nu_{xl} = -\gamma y/r_0 \quad \nu_{xr} = -\nu_{xl}$$

#### 6.4.4.4 PSEUDODESLIZAMIENTO LATERAL

El pseudodeslizamiento lateral en condiciones cuasiestáticas, con pseudodeslizamientos pequeños, es simplemente el ángulo de desvío común a las dos ruedas:

$$\nu_y = -\alpha$$

#### 6.4.4.5 PSEUDODESLIZAMIENTO DE SPIN

En el caso cuasiestático, la velocidad de giro  $\Omega$  es igual a cero y la expresión general se simplifica.

El pseudodeslizamiento de spin  $\varphi$  es:

$$\varphi = \sin \gamma/r_0$$

( $\gamma$  es un valor algebraico, diferente para las dos ruedas).

Esta expresión muestra que el spin tiene una importante cuando se produce la rueda entra en contacto con la pestaña y aumenta su valor con valores pequeños de radios de rueda.

#### 6.4.4.6 VARIACION DE LOS CONTACTOS EN FUNCION DE LOS PSEUDODESLIZAMIENTOS

Johnson supuso que la forma de contacto entre los dos cuerpos, rueda y carril, era una elipse que estaba dividida en dos regiones una de adhesión y otra de deslizamiento. No incluyo la influencia del spin

Se supuso que la forma de la zona de adhesión era una elipse cuyo eje axial coincidía con el eje axial de la elipse de contacto y que ambas elipses se tocaban en su punto mas extremo

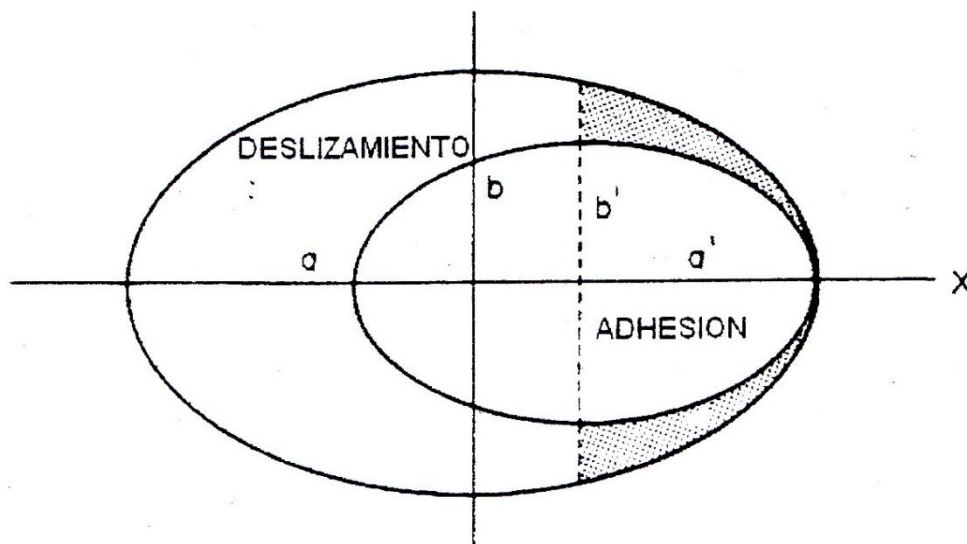


FIGURA 6.4.V –PSEUDODESLIZAMIENTO PARA JONHSON

Más adelante otros autores tuvieron en cuenta mas valores y obtuvieron otras geometrías como las mostradas mas adelante.

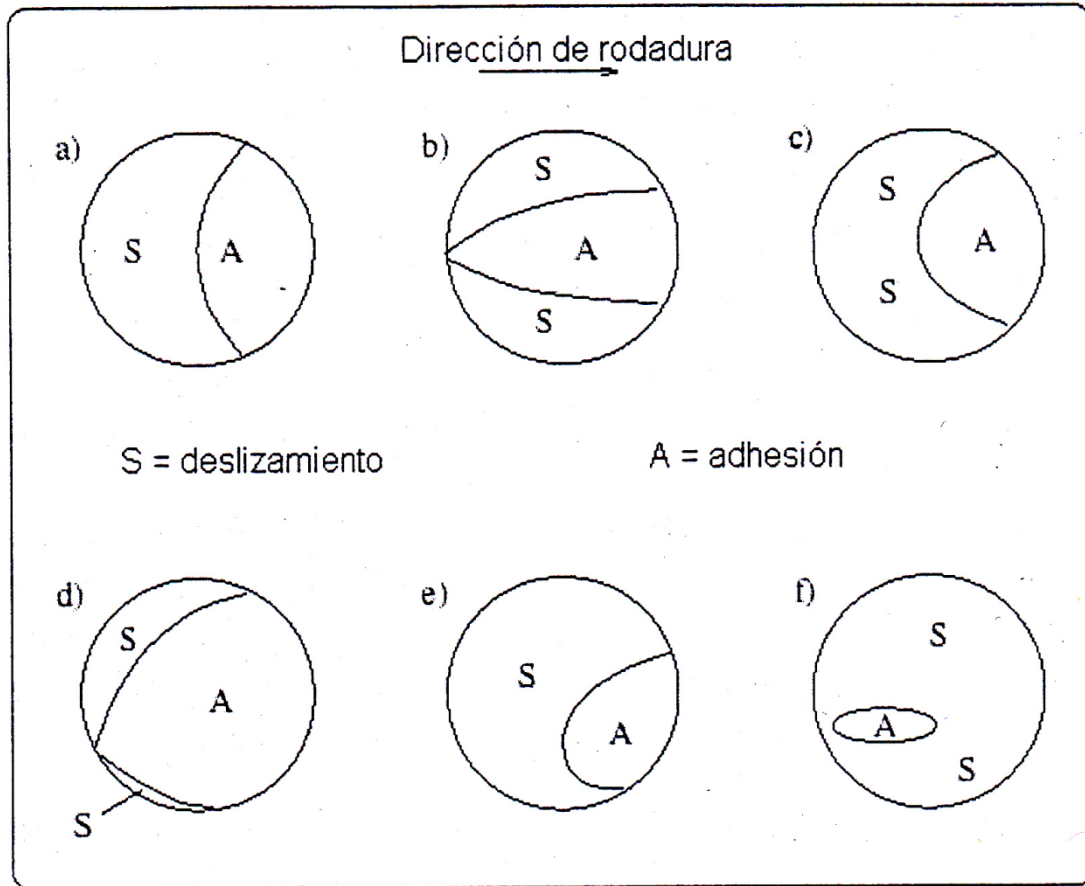


FIGURA 6.4.VI- FORMAS PSEUDESLEZAMIENTO

Casos	$v_x = \xi_x$ pseudodeslizamiento en eje x	$v_y = \xi_y$ pseudodeslizamiento en eje y	$\phi = \psi$ Spin
A	Cualquier valor	Cualquier valor	0
B	0	0	pequeño
C	0	Cualquier valor	Cualquier valor
D	Cualquier valor	0	Cualquier valor
E	Cualquier valor	Cualquier valor	Cualquier valor
F	0	0	alto

TABLA 6.4.I VALORES PSEUDESLEZAMIENTO



#### 6.4.4.7 FORMULACION DINAMICA DE LOS PSEUDODESLIZAMIENTOS

Para las fuerzas dinámicas al nivel del contacto se sigue una formulación idéntica al resto de las uniones dinámicas que se establecen mediante un término elástico y un término amortiguado.

La expresión de los pseudodeslizamientos dinámicos contiene términos de velocidad cuyo signo es opuesto a la deformación elástica, la cual contribuirá a la amortiguación:

$$\nu_{xl} = -\left(\frac{\Delta r}{r_0} + \frac{D_c}{2} \frac{\dot{\alpha}}{\dot{x}}\right) \quad \text{rueda izquierda}$$

$$\nu_{xr} = -\nu_{xl} \quad \text{rueda derecha}$$

$$\nu_y = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} - \alpha$$

$$\varphi = \frac{\sin \gamma}{r_0} - \frac{\dot{\alpha}}{\dot{x}} \cos \gamma \quad (2^\circ \text{ termino} \ll 1^\circ \text{ termino})$$

Donde:

$\alpha$  : es el ángulo de giro relativo al eje montado en el raíl (en radianes)

$r_0$  : es el radio de giro de la rueda

$y$  : es el desplazamiento lateral de la rueda relativo a la posición central

En el pseudodeslizamiento, los parámetros de amortiguación y son inversamente proporcionales a la velocidad de avance. Esto significa que estos parámetros se reducen cuando la velocidad disminuye y el eje montado llega a ser inestable.

#### 6.4.4.8 PSEUDODESLIZAMIENTOS DE SPIN ADIMENSIONALIZADOS

Los pseudodeslizamientos relativos al spin no tienen dimensión.

La última de las expresiones de spin es adimensional y por eso debemos multiplicarla por una distancia. Las características de dimensión de la elipse  $c = \sqrt{ab}$  se usan para obtener el pseudodeslizamiento spin de forma homogénea:

$$c\varphi = c \left( \frac{\sin \gamma}{r_o} - \frac{\dot{\alpha}}{\dot{x}} \cos \gamma \right)$$

#### 6.4.4.9 COMBINACIONES DE PSEUDODESLIZAMIENTO Y SATURACION

En la expresión de arriba, la acción del spin  $\varphi$  sobre la fuerza transversal está separada de la acción de la fuerza sobre el desplazamiento lateral  $v_y$ . La fuerza transversal total es:

$$F_y = F_{y_{yaw}} + F_{y_{spin}}$$

Para el caso de spin despreciable considerando únicamente el contacto de paso, estas expresiones pueden ser usadas y la fuerza lateral que se produce por acción del spin puede ser añadido a la fuerza del ángulo de giro o incluso puede ser despreciada.

En el caso de combinación de pseudodeslizamientos, cuando el spin no se puede despreciar, estas expresiones independientes no son adecuadas debido a la no uniformidad de la combinación de tensiones de cizalla dentro del área de contacto. Un

modelo basado en la descripción de la superficie es necesario, el más común es el modelo FASTSIM realizado por Kalker.

#### 6.4.4 COEFICIENTES DE KALKER $C_{ij}$

El coeficiente  $C_{ij}$  es función del radio de la elipse  $b/a$ . Su valor es aproximadamente  $\pi$  para un valor de  $b/a$  cercano a 1. Inicialmente, Carter utiliza el valor de  $\pi$ .

		$C_{11}$			$C_{22}$			$C_{23} = -C_{32}$			$C_{33}$		
$g$		$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2
0.0		$\pi^2/4(1-\sigma)$			$\pi^2/4 = 2,47$			$\pi\sqrt{g}/3$	—	—	$\pi^2/16(1-\sigma)g$		
a/b	0.1	2.51	3.31	4.85	2.51	2.52	2.53	0.334	0.473	0.731	6.42	8.28	11.7
	0.2	2.59	3.37	4.81	2.59	2.63	2.66	0.483	0.603	0.809	3.46	4.27	5.66
	0.3	2.68	3.44	4.80	2.68	2.75	2.81	0.607	0.715	0.889	2.49	2.96	3.72
	0.4	2.78	3.53	4.82	2.78	2.88	2.98	0.720	0.823	0.977	2.02	2.32	2.77
	0.5	2.88	3.62	4.83	2.88	3.01	3.14	0.827	0.929	1.07	1.74	1.93	2.22
	0.6	2.98	3.72	4.91	2.98	3.14	3.31	0.930	1.03	1.18	1.56	1.68	1.86
	0.7	3.09	3.81	4.97	3.09	3.28	3.48	1.03	1.14	1.29	1.43	1.50	1.60
	0.8	3.19	3.91	5.05	3.19	3.41	3.65	1.13	1.25	1.40	1.34	1.37	1.42
	0.9	3.29	4.01	5.12	3.29	3.54	3.82	1.23	1.36	1.51	1.27	1.27	1.27
b/a	1.0	3.40	4.12	5.20	3.40	3.67	3.98	1.33	1.47	1.63	1.21	1.19	1.16
	0.9	3.51	4.22	5.30	3.51	3.81	4.16	1.44	1.59	1.77	1.16	1.11	1.06
	0.8	3.65	4.36	5.42	3.65	3.99	4.39	1.58	1.75	1.94	1.10	1.04	0.954
	0.7	3.82	4.54	5.58	3.82	4.21	4.67	1.76	1.95	2.18	1.05	0.965	0.852
	0.6	4.06	4.78	5.80	4.06	4.50	5.04	2.01	2.23	2.50	1.01	0.892	0.751
	0.5	4.37	5.10	6.11	4.37	4.90	5.56	2.35	2.62	2.96	0.958	0.819	0.650
	0.4	4.84	5.57	5.57	4.84	5.48	6.31	2.88	3.24	3.70	0.912	0.747	0.549
	0.3	5.57	6.34	7.34	5.57	6.40	7.51	3.79	4.32	5.01	0.868	0.674	0.446
	0.2	6.96	7.78	8.82	6.96	8.14	9.79	5.72	6.63	7.89	0.828	0.601	0.341
	0.1	10.7	11.7	12.9	10.7	12.8	16.0	12.2	14.6	18.0	0.795	0.526	0.228

**TABLA 6.4.II- COEFICIENTES KALKER**

En la bibliografía,  $c_{11}$  y  $c_{22}$  son valores que aporta el coeficiente de Poisson entre 0.25 y 0.5. El valor típico del acero está cercano a 0.27 y en las tablas debe ser interpolado.

Polinomio propuesto para la interpolación es:

$$c_{11} = 3.2893 + \frac{0.975}{b/a} - \frac{0.012}{(b/a)^2}$$

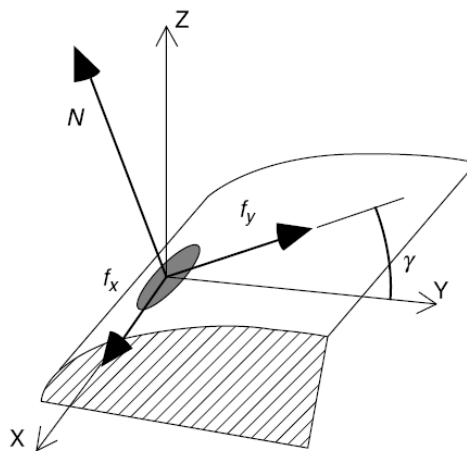
$$c_{22} = 2.4014 + \frac{1.3179}{b/a} - \frac{0.02}{(b/a)^2}$$

$$c_{23} = 0.4147 + \frac{1.0184}{b/a} + \frac{0.0565}{(b/a)^2} - \frac{0.0013}{(b/a)^3}$$

Antes de usar estas expresiones es necesario limitar el coeficiente  $b/a$  a un intervalo (por ejemplo entre  $1/25$  hasta  $25$ ) la aproximación es errónea si el coeficiente  $A/B$  es bajo. Es posible expresar  $C_{ij}$  del coeficiente de curvatura  $A/B$ .

## 6.5 FUERZAS DE CONTACTO SUFRIDAS POR LA RUEDA

Se asumira los ejes de coordenadas mostrados en la **FIGURA 6.3.II** con lo que quedan las siguientes fuerzas

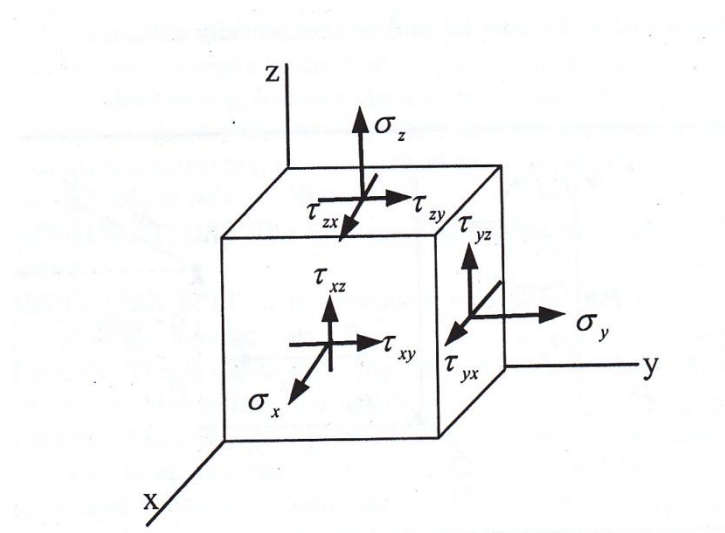


**FIGURA 6.5.I- DISPOSICION FUERZAS**

En el caso particular cuando la fuerza resultante tangencial se satura, la relación adicional es la siguiente forma. Donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción en el punto de contacto

$$f_x^2 + f_y^2 = (\mu N)^2$$

Se podría obtener el siguiente tensor de tensiones, con la siguiente orientación. [37]



**FIGURA 6.5.II- TENSOR TENSIONES**

## 7. CALCULOS

$$\frac{dy}{y} + \frac{(v^2 + 1)}{v(v^2 - 1)} dv = 0$$

$$\frac{dy}{y} + \frac{(v^2 + 1)}{v(v^2 - 1)}$$

$$\frac{dy}{y} + \frac{v^2 - 1}{v(v + 1)(v - 1)} dv = c$$

$$\frac{v^2 + 1}{v(v + 1)(v - 1)} = \frac{A}{v} + \frac{B}{v - 1} + \frac{C}{v + 1}$$

$$v^2 + 1 = A(v - 1)(v + 1) + B(v)(v + 1) + C(v)(v - 1)$$

## 7.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL ESTUDIO

### 7.1.1 CIVIA

El Civia, es un nuevo tipo de material rodante autopropulsado destinado al servicio de viajeros, en trenes de Cercanías, desarrollado por CAF, Siemens, Alstom y Bombardier para RENFE, haciendo especial hincapié en la comodidad para el usuario. Son los primeros trenes de piso bajo, ideales para personas de movilidad reducida. Entro en servicio en 2003.

La construcción de este tipo de vehículo, vino impulsada por la renovación del parque de trenes destinados a prestar servicios de cercanías en grandes núcleos de población, que actualmente son realizados principalmente por unidades hades de la serie 446, 447 y 440. Esta renovación es más importante en los servicios prestados por la serie 440, la cual empezaba a alcanzar el límite de su vida útil.



FIGURA 7.1.1- SERIE 447 (IZQUIERDA) Y CIVIA (DERECHA)

Otra causa importante para su desarrollo, y que se refleja en su diseño, fue la satisfacción de nuevos requerimientos de confort y calidad en el transporte demandados por los viajeros, así como las prestaciones de explotación, es decir la fiabilidad, frecuencia y puntualidad de las circulaciones.

Una de las características del Civia es su modularidad, lo que les permite adecuar el número de coches por la unidad a la demanda existente. De esta manera los trenes pueden estar formados por dos, tres, cuatro o cinco coches, existiendo únicamente tres tipos de coche con los que forman estas configuraciones.

Los cambios de configuración se realizan en los talleres en un plazo mínimo de tiempo, agregando coches para las horas punta y dejando menor número de en las horas de menor tráfico. Los tipos de coche son:

- A1.- Coche extremo con cabina de conducción y piso normal
- A2.- Coche intermedio con piso normal
- A3.- Coche intermedio con W.C. y piso bajo

El coche tipo A3 tiene la altura de su piso adaptada a la misma altura que los andenes de la red de cercanías con objeto de facilitar la entrada a personas con movilidad reducida.

A su vez los distintos tipos de coche son soportados por dos tipos de bogies, denominados BR y BM. El BR, es el denominado bogie remolque y se encuentra en los extremos de la unidad. El bogie BM, es el bogie motor, compartido por cada dos coches intermedios, a esta configuración se le denomina bogie compartido. Al tener prácticamente todos los bogies motorizados, las prestaciones del tren son independientes del número de coches que formen la unidad. [38]

Todos los bogies son de dos ejes, con ruedas monobloque templadas superficialmente en su zona de rodadura. La suspensión primaria es de resortes de



caucho y la secundaria neumática. Los bogies motores llevan dos motores de tracción asíncronos, suspendidos del bastidor, que accionaba cada eje por medio de un acoplamiento y un reductor de doble etapa calado en el eje. El freno neumático de los bogies se aplica sobre discos montados en cada rueda.



**FIGURA 7.1.II- CIVIA SERIE 465 -**

Con estos tipos de coche y de acuerdo a la numeración UIC, se formaran las series 462, 463, 464 y 465 según el número de coches que lleven.

- 462. Tren de dos coches y tres bogies
- 463. Tren de tres coches y cuatro bogies
- 464. Tren de cuatro coches y cinco bogies
- 465. Tren de cinco coches y seis bogies

Las características de estos vehículos aparecen en el anexo

### **7.1.2 RUEDA**

Las ruedas elegidas para la realización de los cálculos son las representadas en los anexos. Estas ruedas son las utilizadas por los trenes de la clase Civia

Todos los valores o datos, contra los que se han comparado los resultados obtenidos en estos cálculos, se han obtenido de la norma, UNE 13262. Los datos utilizados están representados en el anexo.

### **7.1.3 EL CARRIL**

El carril utilizado para estos cálculos es el UIC, cuyo perfil esta en el anexo. La posición del carril viene determinada por el uso de la traviesa, cuyo perfil se representa en el anexo.

## 7.2 CALCULOS DE TENSIONES

Todos los valores de radios se calcularon gráficamente usando Autocad. [39]  
Las cuentas fueron realizadas con Mathcad. [40]

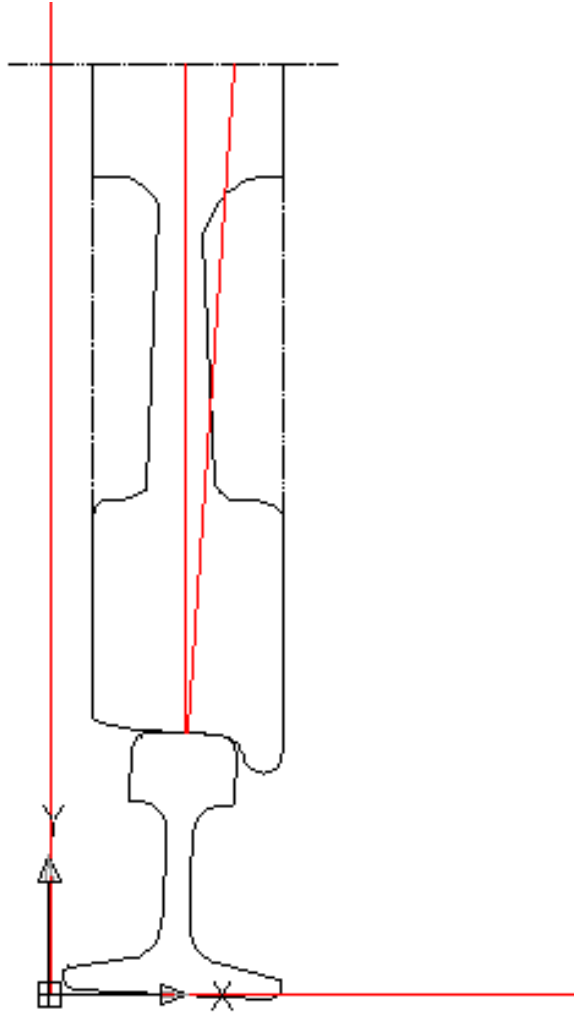
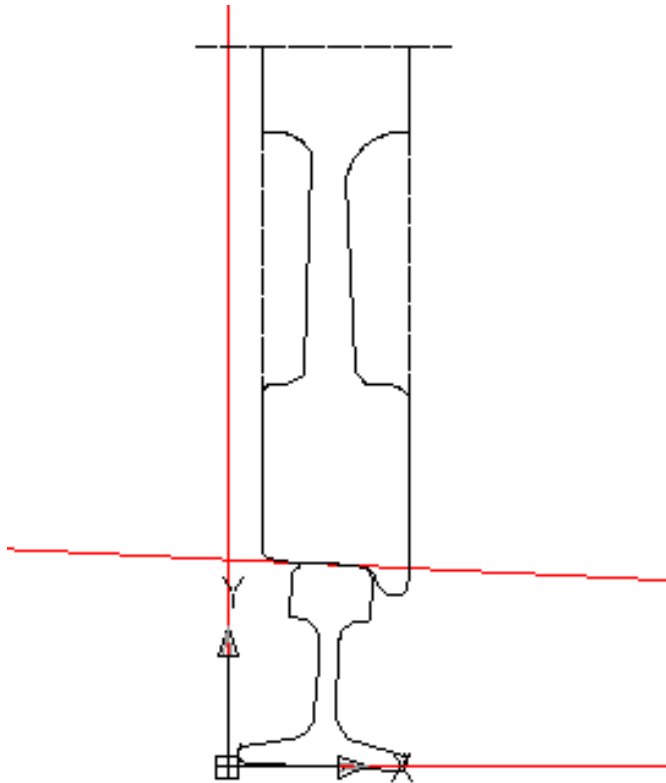


FIGURA 7.2.1- RADIO LONGITUDINAL RUEDA  $R_{wy}$  -

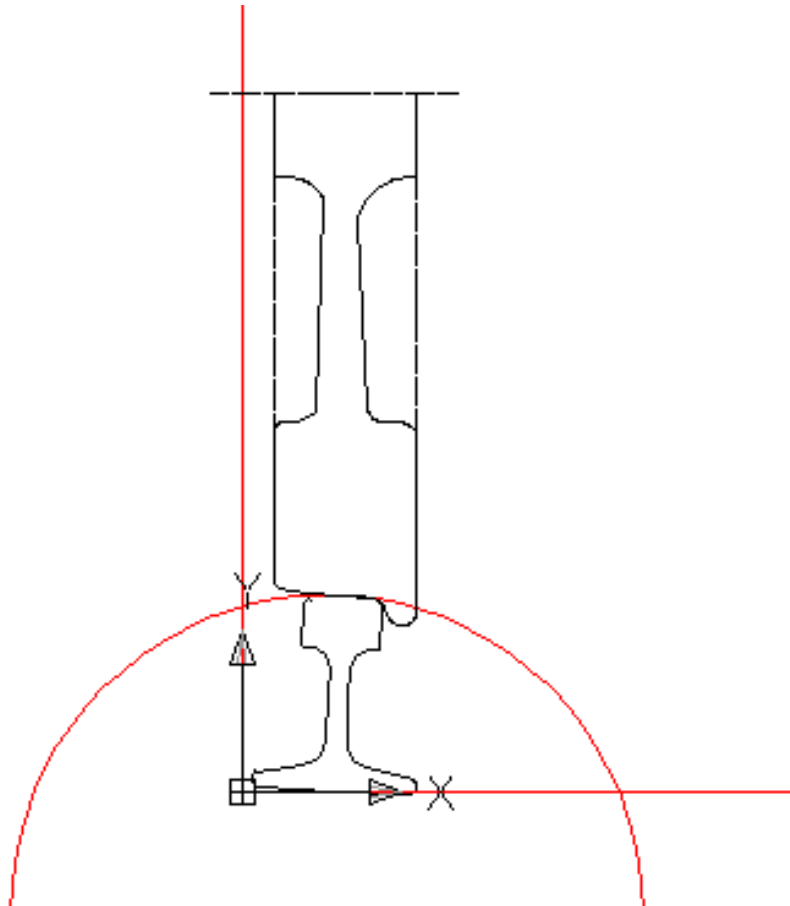
$$R_{wy} = 0.47559\text{m.}$$

FIGURA 7.2.II- RADIO TRANSVERSAL RUEDA  $R_{wx}$  -

$$R_{wx} = -482940m$$

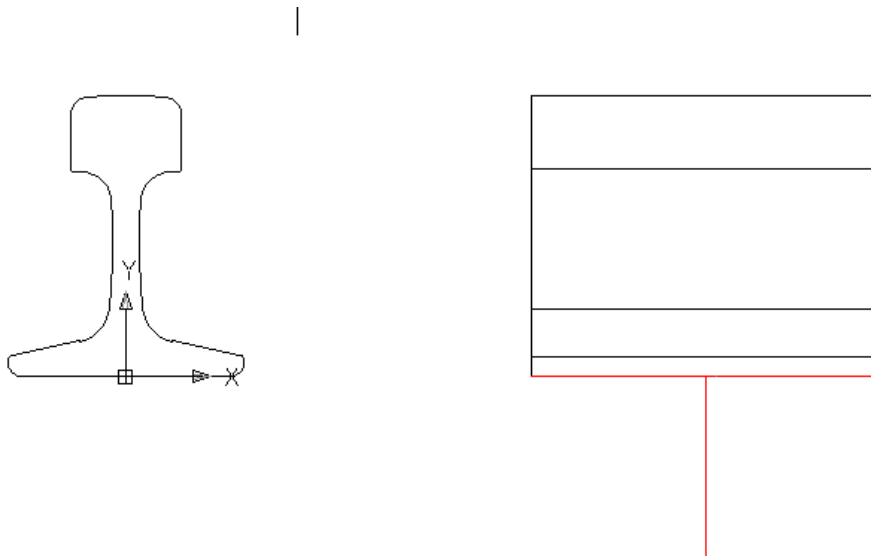
Este valor es lógico. Ya que la parte de la rueda donde apoya con el carril es una recta con pendiente 1:20. Lo cual produce que el radio tienda a infinito. No llega a infinito, ya que la longitud donde apoya es pequeña, si dicha longitud fuese más grande (como sucede en el carril) sería un valor mucho mayor.

El signo menos es debido a que el centro de dicho esta en la zona del carril, luego se supone que la superficie es convexa.



**FIGURA 7.2.III- RADIO TRASVERSAL CARRIL  $R_{cx}$  O DE BOMBEO -**

$$R_{cx} = 0.3m$$



**FIGURA 7.2.IV- RADIO LONGITUDINAL CARRIL  $R_{cy}$  -**

$$R_{cy} = \infty m.$$

$$A1 := \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{wx}} + \frac{1}{R_{cx}} \right)$$

$$A1 = 1.051 \frac{1}{m}$$

$$B1 := \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{wy}} + \frac{1}{R_{cy}} \right)$$

$$B1 = 1.667 \frac{1}{m}$$

$$A1 + B1 = 2.718 \frac{1}{m}$$

$$B1 > 0$$

$$B1 > A1 \Rightarrow a > b$$

$$\theta := \arccos \left( \frac{B1 - A1}{B1 + A1} \right)$$

$$\theta = 76.915 \text{deg}$$

Los valores de las funciones de Hertz

Para  $\theta = 75$ ;  $m=1.202$

Para  $\theta = 80$ ;  $m=1.128$

Linealizo

$$\frac{75 - 76.91}{75 - 80} = \frac{1.202 - m}{1.202 - 1.128}$$

$$m_a = 1.17$$

Para  $\theta=75$ ;  $n=0.846$

Para  $\theta=80$ ;  $n=0.893$

Linealizo

$$\frac{75 - 76.91}{75 - 80} = \frac{0.846 - n}{0.846 - 0.893}$$

$$n_b = 0.863$$

El peso soportado por cada rueda viene representado por la Normal

El peso del tren es 157300 kg. El ángulo que forma la Normal con la vertical es  $\psi$ .

$$\psi := 2.76 \text{ deg}$$

$$\text{Normal} := \frac{\cos(\psi) \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 157300 \text{ kg}}{24}$$

$$\text{Normal} = 64.156 \text{ kN}$$

$$a := m_a \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2) \cdot \text{Normal}}{4 \cdot E \cdot (A1 + B1)}}$$

$$a = 7.305 \text{ mm}$$

$$b := n_b \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2) \cdot \text{Normal}}{4 \cdot E \cdot (A1 + B1)}}$$

$$b = 5.265 \text{ mm}$$

Cuando la rueda y el carril son nuevos, el contacto es la elipse de Hertz. Cuya área es:

$$\text{Area}_{\text{nuevo}} := \pi \cdot a \cdot b$$

$$Area_{nuevo} = 120.826mm^2$$

Si ambas superficies están gastadas, las curvaturas se representan mejor como dos cilindros. El resultado es que el contacto es como un rectángulo, con los mismos lados que la elipse de Hertz.

$$Area_{usada} := 2 \cdot a \cdot 2 \cdot b$$

$$Area_{usada} = 153.84mm^2$$

Las tensiones que soportan debido al peso.

$$\sigma_n := \frac{-N}{Area_{nuevo}}$$

$$\sigma_n = -530.98MPa$$

$$\sigma_u := \frac{-N}{Area_{usada}}$$

$$\sigma_u = -417.032MPa$$

Se considerara el contacto como usado, a partir de ahora. Ya que el valor de tensión para área nueva es mayor de 520MPa, lo cual significaría que la rueda plastifica.

Las formulas de Kalker son las siguientes. Se calculan los coeficientes de Kalker, para usar la teoría de Kalker lineal.

$$b/a=0.863/1.17=0.737$$



$$C11 := 3.2893 + \frac{0.975}{\frac{b}{a}} - \frac{0.012}{\left(\frac{b}{a}\right)^2}$$

$$C11 = 4.592$$

$$\xi_x := 0.000$$

$$F_x := C11 \cdot a \cdot b \cdot G \cdot \xi_x$$

$$F_x = 5.843 \times 10^3 \text{ N}$$

$$\tau_{xz} := \frac{F_x}{\text{Area}_{usada}}$$

$$\tau_{xz} = 37.414 \text{ MPa}$$

Para el eje y

$$C22 := 2.4 + \frac{1.3179}{\frac{b}{a}} - \frac{0.02}{\left(\frac{b}{a}\right)^2}$$

$$C22 = 4.154$$

$$\xi_y := 0.000$$

$$F_y := C22 \cdot a \cdot b \cdot G \cdot \xi_y$$

$$F_y = 7.928 \times 10^3 \text{ N}$$

$$\tau_{yz} := \frac{F_y}{\text{Area}_{usada}}$$

$$\tau_{yz} = 50.47 \text{ MPa}$$

Se monta la matriz de tensiones. Todos los valores están en Mpa. Los ejes como aparecen en la **FIGURA 6.3.II**

$$\sigma_x := 0 \text{ MPa} \quad \sigma_y := 0 \text{ MPa} \quad \sigma_z := \sigma_u \quad \tau_{xy} := 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 37.196 \\ 0 & 0 & 50.47 \\ 37.196 & 50.47 & -408.41 \end{pmatrix} \text{ MPa}$$

Calculamos la tensión de Von mises.

$$\sigma_{vm} := \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{xy}^2)}{2}}$$

$$\sigma_{vm} = 433.087 \text{ MPa}$$

La tensión es menor que el límite plástico exigido por la normativa. La rueda no ha plastificado. Ya que el límite elástico mínimo exigido por la normativa es de 520 Mpa.

## 7.3 CALCULOS DE LONGITUD CRÍTICA PARA EL CASO DE FISURA EN VELO

### 7.3.1 INTRODUCCION

Para poder aplicar las teorías de fractura hay que conocer el  $K_{IC}$  y  $K_{IIC}$ . Se calcularan usando correlaciones empíricas. Ya que la normativa exige un  $K_Q$  de 80.

$$R_{0.2} := 520 \text{ MPa}$$

$$U := 17 \text{ J}$$

Para aceros tenemos las siguientes constantes

$$C1 := 0.644 \frac{\text{MPa} \cdot \text{m}}{\text{J}}$$

$$C2 := 0.006r$$

$$K_{IC} := \sqrt{C1 \cdot U \cdot R_{0.2} - C2 R_{0.2}^2}$$

$$K_{IC} = 63.801 \text{m}^{0.5} \text{MPa}$$

$$\nu = 0.3$$

$$\kappa := 3 - 4\nu$$

$$\kappa = 1.8$$

$$K_{IIC} := \sqrt{\frac{8(\kappa - 1)}{(\kappa + 1)^2}} \cdot K_{IC}$$

$$K_{IIC} = 57.645 \text{m}^{0.5} \text{MPa}$$

También hay que calcular  $\tau$  para ponerlo el tensor de tensiones en 2D

$$\tau := \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}$$

$$\tau = 62.824 \text{MPa}$$

Este es el caso a estudiar el de una rueda con una fisura en el velo sometida a una fuerza de compresión mas una fuerza cortante, esquematizada en la siguiente figura. El caso es que es como si la rueda a partir de este momento no girase y se desplazase, por ese motivo se puede sustituir la rueda por una probeta.

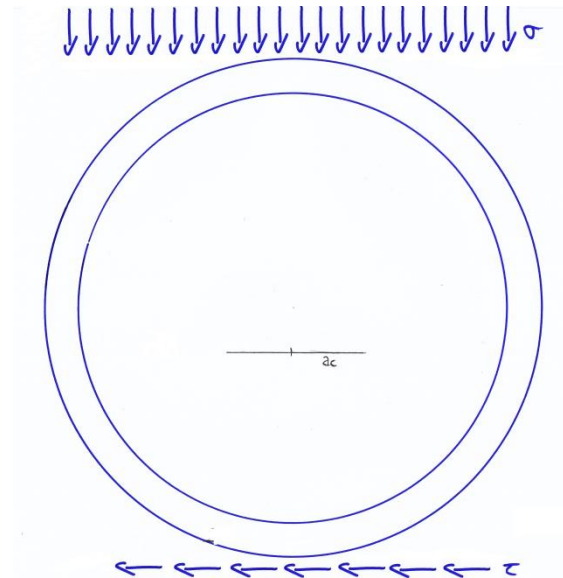
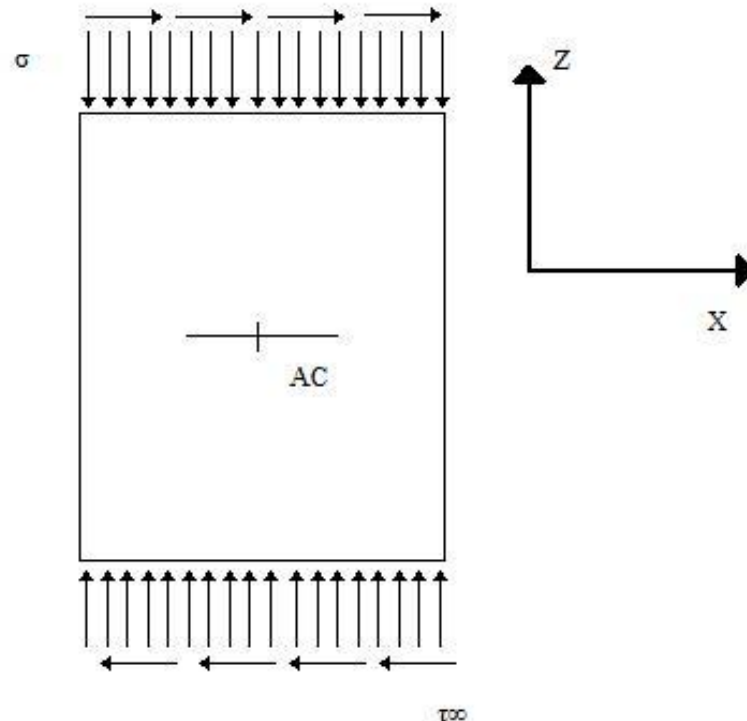


FIGURA 7.3.I. CASO FISURA EN VELO

La disposición de la probeta a estudiar queda de la siguiente manera. Se aproximara la rueda a una probeta cuadrada del ancho y largo el diámetro de la rueda, que es 880mm. Será la suficientemente gruesa para poder utilizar las tenacidades de fractura. El factor de forma tendra la siguiente expresión, que se puede consultar en los anexos.

$$\underline{W} := 880\text{mm}$$

$$\alpha_{\text{forma}_1} := \left[ 1 + 0.5 \left( \frac{a_{c_1}}{W} \right)^2 + 20.46 \left( \frac{a_{c_1}}{W} \right)^4 + 81.72 \left( \frac{a_{c_1}}{W} \right)^6 \right]^{\frac{1}{2}}$$



### 7.3.II MODELO FISURA EN VELO

#### 7.3.2 CRITERIO $K_{IC}$

##### Hipótesis:

- Para usar este criterio las zonas plásticas se consideran pequeñas, en comparación con la longitud de la fisura
- Se asumirá la teoría de Yoffe, la tensión de compresión en la probeta libera la misma energía que si fuese a tracción excepto que los labios de la fisura rozan, por lo que tenemos que multiplicar dicha tensión por el coeficiente de rozamiento. El signo

menos es para utilizar el siguiente criterio de signos. La tensión es negativa por ser de compresión pero  $K_I$  es siempre positivo.

- No se tiene en cuenta la tensión esfuerzo cortante

$$i := 0..30$$

$$a_{c_i} := i \cdot mn$$

$$K_{I_i} := -\alpha_{\text{forma}_i} \cdot \mu \cdot \sigma_z \cdot \sqrt{\pi a_{c_i}}$$

$$K_{I_{86}} = 63.898 m^{0.5} \text{ MPa}$$

$$\alpha_{\text{forma}_{86}} = 1.003$$

### 7.3.4 CRITERIO DE $K_{IIc}$

#### Hipótesis:

- Para usar este criterio las zonas plásticas se consideran pequeñas, en comparación con la longitud de la fisura
- Se asume que la tensión de compresión no afecta a la fisura. En todo caso retardando el tiempo de crecimiento.

$$K_{II_i} := \alpha_{\text{forma}_i} \cdot \tau \cdot \sqrt{\pi a_{c_i}}$$

$$K_{II_{225}} = 56.469 m^{0.5} \text{ MPa}$$

$$\alpha_{\text{forma}_{225}} = 1.069$$

### 7.3.4 CRITERIO DE WO

#### Hipótesis:

- Para usar este criterio las zonas plásticas se consideran pequeñas, en comparación con la longitud de la fisura
- Se asumirá la teoría de Yoffe, la tensión de compresión en la probeta libera la misma energía que si fuese a tracción excepto que los labios de la fisura rozan, por lo que tenemos que multiplicar dicha tensión por el coeficiente de rozamiento. Esto no afecta a la esfuerzo cortante.

$$a_{\text{critica\_Wo\_1}} := \left[ \frac{K_{\text{IC}}^2 \cdot K_{\text{IIC}}^2}{(\mu \cdot \sigma_z)^2 \cdot K_{\text{IIC}}^2 + \tau^2 \cdot K_{\text{IC}}^2} \right] \cdot \frac{1}{\pi}$$

$$a_{\text{critica\_Wo\_1}} = 65.287 \text{ mm}$$

$$\alpha_{\text{forma}_{63}} = 1.002$$

### 7.3.3 CRITERIO DE YOFFE

#### Hipótesis:

- Zonas de plastificación grandes
- Los labios de la fisura rozan entre ellos. Luego la compresión debe ser multiplicada por el coeficiente de rozamiento, produciendo un descenso de la energía producida por la esfuerzo cortante.

$$a_{\text{yoffe}} := \left[ \frac{K_{\text{IIC}}}{2(\tau + \mu \cdot \sigma_z)} \right]^2 \cdot \frac{1}{\pi}$$

$$a_{\text{yoffe}} = 74.203 \text{ mm}$$

$$\alpha_{\text{forma}_{74}} = 1.002$$

### 7.3.4 CRITERIO DEL GIRO DE LA GRIETA

#### Hipótesis:

- La grieta crece linealmente hasta que gira bruscamente, creciendo inestablemente y produciendo el fallo catastrófico. Esto ocurrirá para la longitud más pequeña posible.
- Se asumirá la teoría de Yoffe, la tensión de compresión en la probeta libera la misma energía que si fuese a tracción excepto que los labios de la fisura rozan, por lo que tenemos que multiplicar dicha tensión por el coeficiente de rozamiento, pero sin afectar a la esfuerzo cortante. El signo menos es para utilizar el siguiente criterio de signos.

$$K_{\text{I}_{1,i}} := \mu \cdot \sigma_z \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{c_i}}$$

$$K_{\text{II}_{1,i}} := \tau \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{c_i}}$$

$$j := 0..90$$



$$\beta_j := j \cdot \text{deg}$$

$$A11_{j,1} := \frac{1}{4} \cdot \left( 3 \cdot \cos\left(\frac{\beta_j}{2}\right) + \cos\left(\frac{3\beta_j}{2}\right) \right)$$

$$A12_{j,1} := \frac{-3}{4} \cdot \left( \sin\left(\frac{\beta_j}{2}\right) + \sin\left(\frac{3\beta_j}{2}\right) \right)$$

$$A21_{j,1} := \frac{1}{4} \cdot \left( \sin\left(\frac{\beta_j}{2}\right) + \sin\left(\frac{3\beta_j}{2}\right) \right)$$

$$A22_{j,1} := \frac{1}{4} \cdot \left( \cos\left(\frac{\beta_j}{2}\right) + 3 \cos\left(\frac{3\beta_j}{2}\right) \right)$$

$$K_{1,j,i} := A11_{j,1} \cdot K_{I1,i} + A12_{j,1} \cdot K_{II1,i}$$

$$K_{2,j,i} := A21_{j,1} \cdot K_{I1,i} + A22_{j,1} \cdot K_{II1,i}$$

$$G_{j,i} := \left( \frac{K_{1,j,i} \cdot K_{1,j,i}}{E} + \frac{K_{2,j,i} \cdot K_{2,j,i}}{E} \right) \cdot (1 - \nu^2)$$

$$G_{\text{critico}} := \left( \frac{K_{IC}^2 + K_{IIC}^2}{E} \right) \cdot (1 - \nu^2)$$

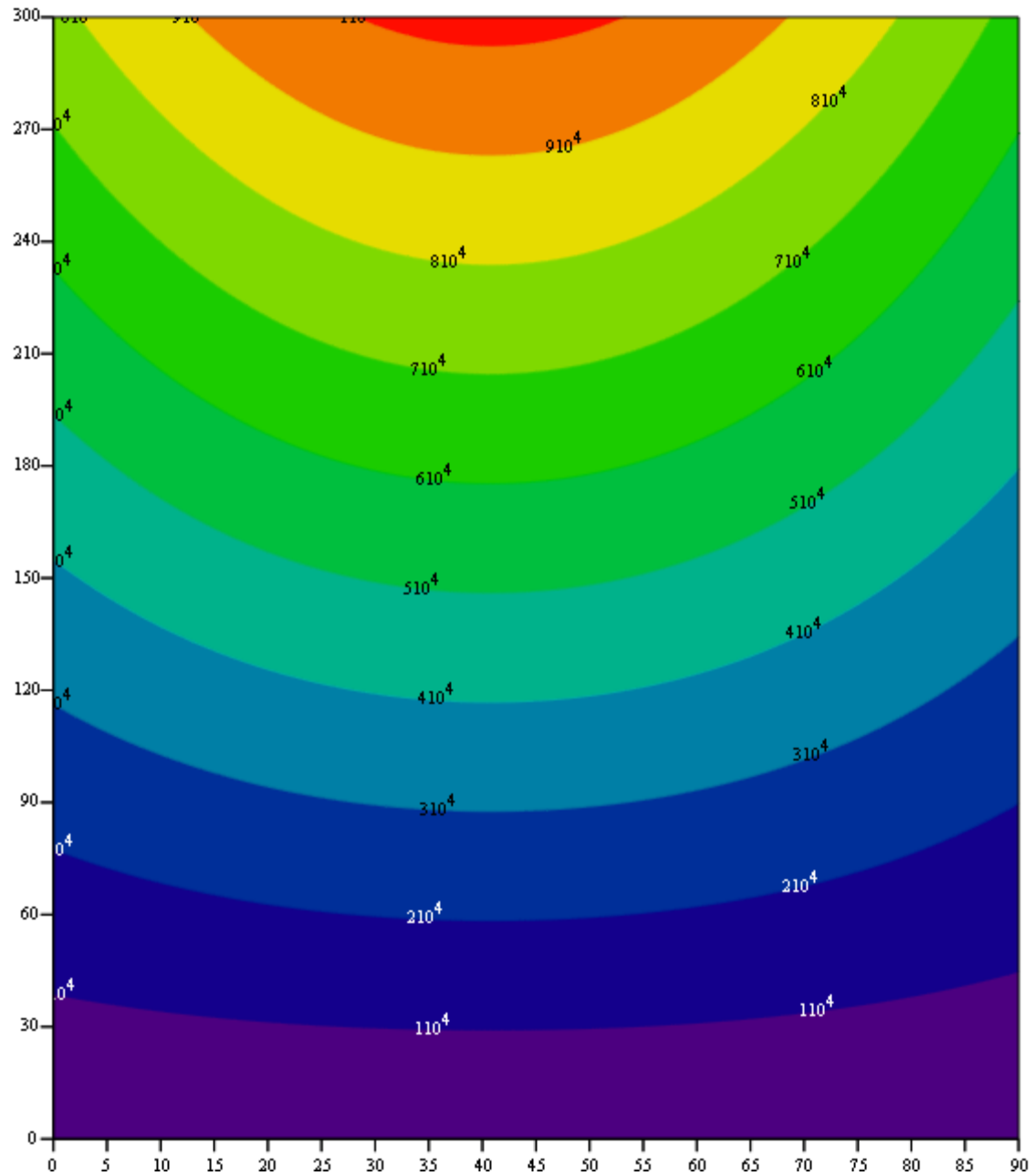
$$G_{\text{critico}} = 3.204 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

$$G_{\text{critico}} = 0.032 \text{ mMPa}$$

# ESTUDIO DE LA LONGITUD CRITICA DE FISURA EN RUEDA FERROVIARIA

	0	1	2	3	4	5	6
0	0	$2.581 \cdot 10^{-4}$	$5.162 \cdot 10^{-4}$	$7.743 \cdot 10^{-4}$	$1.032 \cdot 10^{-3}$	$1.29 \cdot 10^{-3}$	$1.549 \cdot 10^{-3}$
1	0	$2.617 \cdot 10^{-4}$	$5.234 \cdot 10^{-4}$	$7.852 \cdot 10^{-4}$	$1.047 \cdot 10^{-3}$	$1.309 \cdot 10^{-3}$	$1.57 \cdot 10^{-3}$
2	0	$2.653 \cdot 10^{-4}$	$5.306 \cdot 10^{-4}$	$7.959 \cdot 10^{-4}$	$1.061 \cdot 10^{-3}$	$1.327 \cdot 10^{-3}$	$1.592 \cdot 10^{-3}$
3	0	$2.688 \cdot 10^{-4}$	$5.377 \cdot 10^{-4}$	$8.065 \cdot 10^{-4}$	$1.075 \cdot 10^{-3}$	$1.344 \cdot 10^{-3}$	$1.613 \cdot 10^{-3}$
4	0	$2.723 \cdot 10^{-4}$	$5.446 \cdot 10^{-4}$	$8.17 \cdot 10^{-4}$	$1.089 \cdot 10^{-3}$	$1.362 \cdot 10^{-3}$	$1.634 \cdot 10^{-3}$
5	0	$2.757 \cdot 10^{-4}$	$5.515 \cdot 10^{-4}$	$8.272 \cdot 10^{-4}$	$1.103 \cdot 10^{-3}$	$1.379 \cdot 10^{-3}$	$1.654 \cdot 10^{-3}$
6	0	$2.791 \cdot 10^{-4}$	$5.582 \cdot 10^{-4}$	$8.373 \cdot 10^{-4}$	$1.116 \cdot 10^{-3}$	$1.396 \cdot 10^{-3}$	$1.675 \cdot 10^{-3}$
G = 7	0	$2.824 \cdot 10^{-4}$	$5.648 \cdot 10^{-4}$	$8.472 \cdot 10^{-4}$	$1.13 \cdot 10^{-3}$	$1.412 \cdot 10^{-3}$	$1.694 \cdot 10^{-3}$
8	0	$2.856 \cdot 10^{-4}$	$5.713 \cdot 10^{-4}$	$8.569 \cdot 10^{-4}$	$1.143 \cdot 10^{-3}$	$1.428 \cdot 10^{-3}$	$1.714 \cdot 10^{-3}$
9	0	$2.888 \cdot 10^{-4}$	$5.776 \cdot 10^{-4}$	$8.665 \cdot 10^{-4}$	$1.155 \cdot 10^{-3}$	$1.444 \cdot 10^{-3}$	$1.733 \cdot 10^{-3}$
10	0	$2.919 \cdot 10^{-4}$	$5.838 \cdot 10^{-4}$	$8.757 \cdot 10^{-4}$	$1.168 \cdot 10^{-3}$	$1.46 \cdot 10^{-3}$	$1.751 \cdot 10^{-3}$
11	0	$2.949 \cdot 10^{-4}$	$5.899 \cdot 10^{-4}$	$8.848 \cdot 10^{-4}$	$1.18 \cdot 10^{-3}$	$1.475 \cdot 10^{-3}$	$1.77 \cdot 10^{-3}$
12	0	$2.979 \cdot 10^{-4}$	$5.958 \cdot 10^{-4}$	$8.937 \cdot 10^{-4}$	$1.192 \cdot 10^{-3}$	$1.489 \cdot 10^{-3}$	$1.787 \cdot 10^{-3}$
13	0	$3.008 \cdot 10^{-4}$	$6.015 \cdot 10^{-4}$	$9.023 \cdot 10^{-4}$	$1.203 \cdot 10^{-3}$	$1.504 \cdot 10^{-3}$	$1.805 \cdot 10^{-3}$
14	0	$3.036 \cdot 10^{-4}$	$6.071 \cdot 10^{-4}$	$9.107 \cdot 10^{-4}$	$1.214 \cdot 10^{-3}$	$1.518 \cdot 10^{-3}$	$1.821 \cdot 10^{-3}$
15	0	$3.063 \cdot 10^{-4}$	$6.126 \cdot 10^{-4}$	$9.189 \cdot 10^{-4}$	$1.225 \cdot 10^{-3}$	$1.531 \cdot 10^{-3}$	$1.838 \cdot 10^{-3}$

mMPa



G

Esta grafica que una grieta de 95mm que experimentase un giro repentino de 45 grados superaría el  $G_{\text{critico}}$  y sufriría fractura

### 7.3.5 CRITERIO DE LIBERACION DE LA ENERGIA, J

#### Hipótesis:

- Se suponen plastificaron pequeña, ya que el valor crítico de J ha sido calculado a través las tenacidades de fractura.

$$a_{lib} := \frac{K_{IC}^2 + K_{IIC}^2}{(\tau - \mu \cdot \sigma_z)^2 \cdot \pi}$$

$$a_{lib} = 68.508 \text{ mm}$$

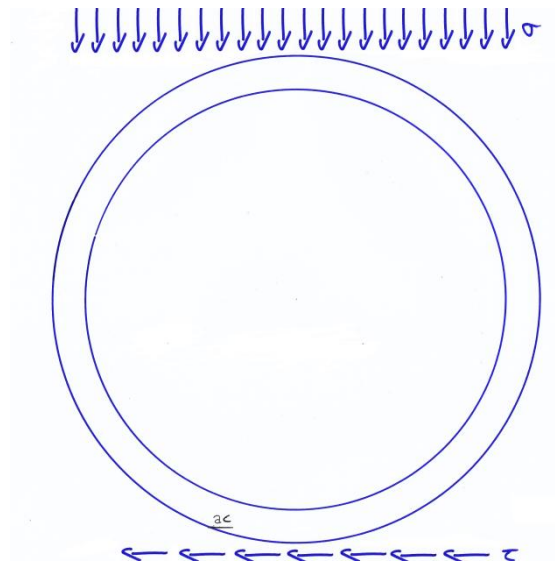
## 7.4 CALCULOS DE LONGITUD CRÍTICA PARA EL CASO DE FISURA EN BANDA DE RODADURA

### 7.4.1 INTRODUCCION

Los cálculos anteriores del acero sigue siendo los mismos, así como las hipótesis para cada criterio elegido.

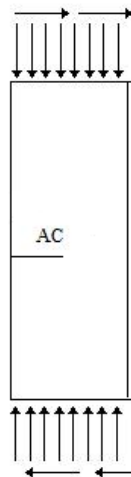
Se aplicara la suposición de que los el factor de forma para el modo I es igual al del modo II.

El caso a estudiar es el siguiente el de una rueda con una fisura en la banda de rodadura que está sometida a compresión mas una esfuerzo cortante. La rueda en un momento dado sufrirá estas fuerzas. A Partir de este momento la rueda solo se desplaza.



#### 7.4.I CASO FISURA BANDA RODADURA

La probeta genérica a estudiar sería la siguiente cuyo ancho estaría en 300mm.



#### 7.4.II MODELO FISURA BANDA RODADURA

Lo que cambiara será el ancho de la probeta teórica a estudiar, lo cual lleva a que el factor de forma es más importante, además cambia la función del factor de forma.

$$W := 320 \text{ mm}$$

$$\alpha_{\text{forma}_i} := 1.12 - 0.23 \left( \frac{a_{c_i}}{W} \right) + 10.55 \left( \frac{a_{c_i}}{W} \right)^2 - 21.71 \left( \frac{a_{c_i}}{W} \right)^3 + 30.48 \left( \frac{a_{c_i}}{W} \right)^4$$

Cabe destacar que ha sido necesario iterar para resolver los métodos.

#### 7.4.2 CRITERIO $K_{IC}$

$$i := 0..30$$

$$a_{c_i} := i \cdot \text{mm}$$

$$K_{I_i} := -\alpha_{\text{forma}_i} \cdot \mu \cdot \sigma_Z \cdot \sqrt{\pi a_{c_i}}$$

$$K_{I_{52}} = 63.847 \text{ m}^{0.5} \text{ MPa}$$

$$\alpha_{\text{forma}_{52}} = 1.289$$

#### 7.3.3 CRITERIO DE $K_{IIC}$

$$K_{II_i} := \alpha_{\text{forma}_i} \cdot \tau \cdot \sqrt{\pi a_{c_i}}$$

$$K_{II_{104}} = 63.001m^{0.5} MPa$$

$$\alpha_{forma_{104}} = 1.754$$

### 7.3.4 CRITERIO DE WO

$$a_{yoffe} := \left[ \frac{K_{IIC}}{2 \cdot \alpha_{forma_{47}} (\tau + \mu \cdot \sigma_z)} \right]^2 \cdot \frac{1}{\pi}$$

$$a_{yoffe} = 0.047 m$$

$$\alpha_{forma_{47}} = 1.259$$

### 7.3.5 CRITERIO DE YOFFE

$$a_{critica\_Wo} := \left[ \frac{K_{IC}^2 \cdot K_{IIC}^2}{(\mu \cdot \sigma_z)^2 \cdot K_{IIC}^2 + \tau^2 \cdot K_{IC}^2} \right] \cdot \frac{1}{(\alpha_{forma_{43}})^2 \cdot \pi}$$

$$a_{critica\_Wo} = 0.043 m$$

$$\alpha_{forma_{43}} = 1.237$$

### 7.3.6 CRITERIO DEL GIRO DE LA GRIETA

$$K_{I_{1,i}} := \alpha_{\text{forma}_{43}} \cdot \mu \cdot \sigma_z \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{c_i}}$$

$$K_{II_{1,i}} := \alpha_{\text{forma}_{43}} \cdot \tau \cdot \sqrt{\pi \cdot a_{c_i}}$$

$$j := 0..90$$

$$\beta_j := j \cdot \text{deg}$$

$$A11_{j,1} := \frac{1}{4} \cdot \left( 3 \cdot \cos\left(\frac{\beta_j}{2}\right) + \cos\left(\frac{3\beta_j}{2}\right) \right)$$

$$A12_{j,1} := \frac{-3}{4} \cdot \left( \sin\left(\frac{\beta_j}{2}\right) + \sin\left(\frac{3\beta_j}{2}\right) \right)$$

$$A21_{j,1} := \frac{1}{4} \cdot \left( \sin\left(\frac{\beta_j}{2}\right) + \sin\left(\frac{3\beta_j}{2}\right) \right)$$

$$A22_{j,1} := \frac{1}{4} \cdot \left( \cos\left(\frac{\beta_j}{2}\right) + 3 \cos\left(\frac{3\beta_j}{2}\right) \right)$$

$$K_{1j,i} := A11_{j,1} \cdot K_{I_{1,i}} + A12_{j,1} \cdot K_{II_{1,i}}$$

$$K_{2j,i} := A21_{j,1} \cdot K_{I_{1,i}} + A22_{j,1} \cdot K_{II_{1,i}}$$

$$G_{j,i} := \left( \frac{K_{1j,i} \cdot K_{1j,i}}{E} + \frac{K_{2j,i} \cdot K_{2j,i}}{E} \right) \cdot (1 - \nu^2)$$



$$G_{\text{critico}} := \left( \frac{K_{IC}^2 + K_{IIC}^2}{E} \right) \cdot (1 - \nu^2)$$

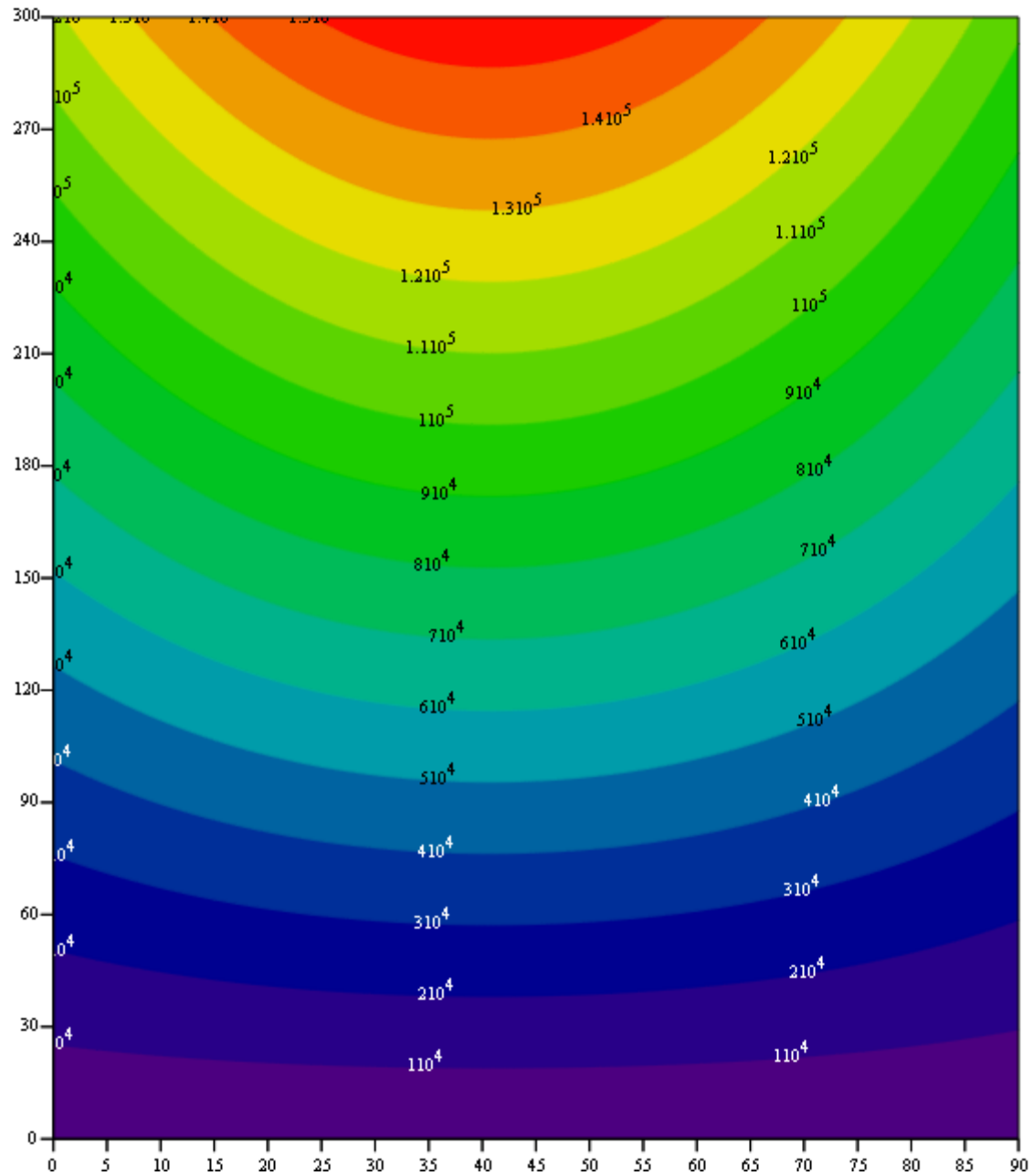
$$G_{\text{critico}} = 0.032 \text{ mMPa}$$

$$G_{\text{critico}} = 3.204 \times 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

	0	1	2	3	4	5	6
0	0	3.948·10 <sup>-4</sup>	7.896·10 <sup>-4</sup>	1.184·10 <sup>-3</sup>	1.579·10 <sup>-3</sup>	1.974·10 <sup>-3</sup>	2.369·10 <sup>-3</sup>
1	0	4.004·10 <sup>-4</sup>	8.008·10 <sup>-4</sup>	1.201·10 <sup>-3</sup>	1.602·10 <sup>-3</sup>	2.002·10 <sup>-3</sup>	2.402·10 <sup>-3</sup>
2	0	4.059·10 <sup>-4</sup>	8.117·10 <sup>-4</sup>	1.218·10 <sup>-3</sup>	1.623·10 <sup>-3</sup>	2.029·10 <sup>-3</sup>	2.435·10 <sup>-3</sup>
3	0	4.113·10 <sup>-4</sup>	8.225·10 <sup>-4</sup>	1.234·10 <sup>-3</sup>	1.645·10 <sup>-3</sup>	2.056·10 <sup>-3</sup>	2.468·10 <sup>-3</sup>
4	0	4.166·10 <sup>-4</sup>	8.332·10 <sup>-4</sup>	1.25·10 <sup>-3</sup>	1.666·10 <sup>-3</sup>	2.083·10 <sup>-3</sup>	2.5·10 <sup>-3</sup>
5	0	4.218·10 <sup>-4</sup>	8.437·10 <sup>-4</sup>	1.266·10 <sup>-3</sup>	1.687·10 <sup>-3</sup>	2.109·10 <sup>-3</sup>	2.531·10 <sup>-3</sup>
6	0	4.27·10 <sup>-4</sup>	8.54·10 <sup>-4</sup>	1.281·10 <sup>-3</sup>	1.708·10 <sup>-3</sup>	2.135·10 <sup>-3</sup>	2.562·10 <sup>-3</sup>
7	0	4.32·10 <sup>-4</sup>	8.641·10 <sup>-4</sup>	1.296·10 <sup>-3</sup>	1.728·10 <sup>-3</sup>	2.16·10 <sup>-3</sup>	2.592·10 <sup>-3</sup>
8	0	4.37·10 <sup>-4</sup>	8.74·10 <sup>-4</sup>	1.311·10 <sup>-3</sup>	1.748·10 <sup>-3</sup>	2.185·10 <sup>-3</sup>	2.622·10 <sup>-3</sup>
9	0	4.418·10 <sup>-4</sup>	8.837·10 <sup>-4</sup>	1.325·10 <sup>-3</sup>	1.767·10 <sup>-3</sup>	2.209·10 <sup>-3</sup>	2.651·10 <sup>-3</sup>
10	0	4.466·10 <sup>-4</sup>	8.932·10 <sup>-4</sup>	1.34·10 <sup>-3</sup>	1.786·10 <sup>-3</sup>	2.233·10 <sup>-3</sup>	2.679·10 <sup>-3</sup>
11	0	4.512·10 <sup>-4</sup>	9.024·10 <sup>-4</sup>	1.354·10 <sup>-3</sup>	1.805·10 <sup>-3</sup>	2.256·10 <sup>-3</sup>	2.707·10 <sup>-3</sup>
12	0	4.557·10 <sup>-4</sup>	9.114·10 <sup>-4</sup>	1.367·10 <sup>-3</sup>	1.823·10 <sup>-3</sup>	2.279·10 <sup>-3</sup>	2.734·10 <sup>-3</sup>
13	0	4.601·10 <sup>-4</sup>	9.202·10 <sup>-4</sup>	1.38·10 <sup>-3</sup>	1.84·10 <sup>-3</sup>	2.301·10 <sup>-3</sup>	2.761·10 <sup>-3</sup>
14	0	4.644·10 <sup>-4</sup>	9.288·10 <sup>-4</sup>	1.393·10 <sup>-3</sup>	1.858·10 <sup>-3</sup>	2.322·10 <sup>-3</sup>	2.786·10 <sup>-3</sup>
15	0	4.686·10 <sup>-4</sup>	9.371·10 <sup>-4</sup>	1.406·10 <sup>-3</sup>	1.874·10 <sup>-3</sup>	2.343·10 <sup>-3</sup>	2.811·10 <sup>-3</sup>

G =

mMPa



G

En la grafica se muestra que con un valor de 61mm y con un ángulo de  $45^\circ$  se fracturara

### 7.3.7 CRITERIO DE LIBERACION DE LA ENERGIA, J

$$a_{lib1} := \frac{K_{IC}^2 + K_{IIC}^2}{\left(\tau - \mu \cdot \sigma_z\right)^2 \cdot \pi \cdot \left(\alpha_{forma_{44}}\right)^2}$$

$$a_{lib1} = 44.391\text{mm}$$

# 8 CONCLUSIONES

WTHD 52

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT  
DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



## ON THE ROLLING CONTACT OF TWO ELASTIC BODIES IN THE PRESENCE OF DRY FRICTION

by

J. J. Kalker

Augustus  
1973

LABORATORIUM VOOR  
TECHNISCHE MECHANICA  
DELFT

52

## **8.1 RESUMEN**

### **8.1.1 TEMA 1: INTRODUCCION**

Se ha explicado porque se han escogido el tema del ferrocarril y más concretamente la rueda y sus fracturas para el desarrollo de este proyecto

### **8.1.2 TEMA 2: OBJETIVOS**

Cuatro objetivos fueron expuestos sobre esta memoria: hacer estudio de fractura, estudiar las tensiones que aparecen en la rueda con las teorías de Hertz y Kalker, calcular las longitudes críticas de fractura y proponer trabajos futuros

### **8.1.3 TEMA 3: FRACTURA**

Se han explicado los modos que hay en fractura y cuales surgen en el ferrocarril y el motivo. Han sido explicados parámetros de diseño y criterios de fractura en modo I. Fueron descritos varios modos mixtos con sus correspondientes criterios, así como el modo II y un modelo a compresión

### **8.1.4 TEMA 4: LA RUEDA FERROVIARIA**

En este tema fueron explicados las partes de la rueda, defectos que aparecen, un tipo de movimiento muy característico de la rueda ferroviaria y su forma de fabricación

### 8.1.5 TEMA 5: LA VIA

Se han mostrados los elementos que caracterizan a la vía, así como sus funciones y características principales.

### 8.1.6 TEMA 6: TEORIA CONTACTO

Las teorías de Hertz y Kalker fueron mostradas en este capítulo, con su desarrollo matemático y su forma de aplicación en este documento.

### 8.1.7 TEMA 7: CALCULOS

Las tensiones que sufre una rueda han sido calculadas, usando los métodos de Kalker y la teoría de Hertz, para la cual ha sido necesario calcular gráficamente los radios de curvatura. El tensor de tensiones resultantes es.

$$\sigma = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 37.196 \\ 0 & 0 & 50.47 \\ 37.196 & 50.47 & -408.41 \end{pmatrix} \text{MPa}$$

Después, se usan varias teorías de fractura para calcular las longitudes críticas con las que se obtuvieron los resultados mostrados en la siguiente tabla.

	<b>K<sub>IC</sub></b>	<b>K<sub>IIC</sub></b>	<b>W<sub>O</sub></b>	<b>YOFFE</b>	<b>GIRO</b>	<b>J</b>
<b>H I P O T E S I S</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonas plásticas pequeñas</li> <li>• No afecta el esfuerzo cortante</li> <li>• Compresión multiplicada por el factor de rozamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zonas plásticas pequeñas</li> <li>• Se asume que la tensión de compresión no afecta a la fisura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonas plásticas grandes</li> <li>• Compresión multiplicada por el factor de rozamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonas plásticas grandes</li> <li>• Los labios de la fisura rozan entre ellos. Produciendo un descenso de la energía producida por la esfuerzo cortante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La grieta crece linealmente hasta que gira bruscamente, creciendo inestablemente y produciendo el fallo catastrófico</li> <li>• Se asumirá la teoría de Yoffe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zonas plásticas pequeñas, el valor crítico de J ha sido calculado a través las tenacidades de fractura.</li> <li>• Compresión multiplicada por el factor de rozamiento</li> </ul>
<b>V E L O</b>	86mm	225mm	65mm	74mm	95mm	68mm
<b>B R</b>	52mm	104mm	43mm	47mm	61mm	44mm

TABLA 8.1.I- HIPOTESIS Y RESULTADOS-

## 8.2 CONCLUSIONES

Las conclusiones de la memoria son las siguientes:

- Las grietas se originaron en algún defecto interno, inclusiones, o concentrador de tensiones (taladro, radio de acuerdo...) o zona de máxima esfuerzo cortante (normalmente de 3 a 5 mm por debajo de la banda de rodadura), crecerán muy lentamente en modo II ya que están sometidas a compresión y el modo II es un modo de crecimiento muy lento. Como el método II y mas sometido a compresión tendera a girar la grieta. Una vez que gire el crecimiento tendera a ser inestable.
- La forma de fisura obtenida se corresponde en la realidad con las producidas por blocajes, esto es así debido a la hipótesis de que la rueda solo se desplaza. Seguramente

con un algoritmo informático se podrá predecir el camino y la longitud crítica de fisura con ruedas girando.

- Valores altos de  $K_{EE}$  dan mejor condiciones a fractura que valores altos de  $K_Q$  con valores bajos de  $K_Q$ . La normativa solo exige valores de  $K_Q$  mayores de  $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y en conjunto en la rueda de  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Se propone un cambio en la normativa que debería de exigir que los valores de  $K_Q$  entre  $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  un valor  $K_{EE}$  alto.
- Los parámetros  $K_Q$  y  $K_{EE}$  han mostrados que son indicativos en el control de actividades de producción de las ruedas. Medidas de la rigidez a fractura de las ruedas por la innovación del parámetro  $K_{EE}$  combinado con el  $K_Q$  y con el control de la micro-limpieza y la micro-estructura puede fácilmente ser usados para definir un criterio ampliamente aceptado durante la inspección del material.
- Las ruedas de frenado soportan mayores esfuerzos cotantes, que son las iniciadoras de las fisuras. La normativa solo exige valores  $K_Q$  en las ruedas de freno. Sin embargo, a la vista de los cálculos y los resultados, los valores de rigidez a aparente a fractura deberían de ser exigidas en todas las ruedas.
- Un buen modo de seguir la calidad del material durante la producción es la introducción del índice,  $YS \times K_Q$
- Mejores microlimpieza conllevan mejores valores de rigidez a fractura.
- La teoría de hertz aplicada directamente a la rueda del ferrocarril puede llevar a resultados donde la rueda plastifica, dicha teoría puede ser usada para tener una idea aproximada de las tensiones que aparecen y para comparar entre dos ruedas diferentes. Una teoría más correcta para el mundo ferroviario es pensar en la zona de contacto como un rectángulo, cuyos valores se aproximen a los resultados obtenidos por Hertz.
- La teoría de Kalker lineal solo da valores razonables para pseudodeslizamientos pequeños.



- Los resultados obtenidos para las longitudes críticas muestran que el criterio de tenacidades a fractura en modo II no es representativo. Lo cual es lógico, por que como se ha explicado las fisuras aunque solo exista el modo II, acaban girando para propagarse en modo I.
- Se puede observar que el criterio en modo I de tenacidad a fractura da un resultado comparable a otros métodos, no es el más restrictivo. Con lo que puede ser utilizado para tener una primera aproximación.
- Los métodos en los cuales la energía solo se emplean en crecer, no en girar o disminuir la esfuerzo cortante, son más restrictivos.
- Los resultados están fuertemente influenciados por los factores de forma.
- Los resultados obtenidos se pueden extrapolar a otros cuerpos tales como ejes, rodamientos...cuerpos sometidos a esfuerzo cortante y compresión.

### 8.3 FUTUROS TEMAS ESTUDIOS

A la vista de las conclusiones mostradas posibles temas futuros de estudio son los siguientes:

- Seguir desarrollando métodos de medir la tenacidad a fractura en modo II,
- Conseguir factores de forma tanto para modo II como para cuerpos distintos a probetas, así como validar las hipótesis hecha de que el factor de forma en una probeta en modo I es igual a una en modo II
- Estudios más profundos sobre la propagación de fracturas en cuerpos sometidos a modo mixto y a compresión



- Validación de las hipótesis en los cálculos a fractura, así como la realización de modelos matemáticos para la resolución
- Realización de los mismos cálculos pero para modo III
- Crear algoritmo matemático para determinar el camino de la fisura y la longitud critica de fisura evitando la hipótesis de que la rueda solo se desplaza.
- Crear criterios de longitudes criticas de fisuras en los que se utilicen  $K_Q$  y  $K_{EE}$

## 9. BIBLIOGRAFIA



## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1].- Tutor de proyecto: **Julio Álvarez Rodríguez**
- [2].- Normativa EN 13 262 Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ruedas. Requisitos del proyecto.
- [3].- Documental del Discovery channel. “The crash at eschede”
- [4].- Apuntes tecnología de maquinas. 4º Ingeniería Industrial Universidad Carlos III Madrid
- [5].- Apuntes fractura y fatiga. 4º Ingeniería Industrial Universidad Carlos III Madrid
- [6]. -Apuntes Comportamiento en servicio. 4º Ingeniería Industrial Universidad Carlos III Madrid
- [7].- ORE Frage B 169, Thermische Grenzen der Räder und Bremsklötze, Bericht Nr. 2: *Auswirkung häufiger Bremsungen auf das Eigenspannungsfeld im Radkranz.*
- [8].- Development of testing methodologies according to fracture mechanics criteria applied to railways solid wheels. **M. DIENER**
- [9]. Study on Fracture Toughness of R7T UIC 812. **M. DIENER**
- [10] Pratique des plans d'expérience - Méthodologie TAGUCHI, **VIGIER, M.G**
- [11].- Multiaxial Fatigue; **Darriel F Socie**
- [12].- Cracks and fracture; **Bertram Broberg**
- [13].- Fracture mechanics; **Néstor Pérez**
- [14].- Apuntes de la asignatura Ferrocarriles. 5º Ingeniería Industrial Universidad Carlos III Madrid
- [15].- Handbook of Railway Vehicle Dynamics chapter 3.- The Anatomy of Railway Vehicle Running Gear. **Simon Iwnicki**
- [16].- proyecto final de carrera “Estudio de fisuras en ruedas ferroviarias y del reperfilado en vehículos Civia”. **Ángel Fernández Susmozas**
- [17].- Medicion de parámetros de rodadura en ramas alaris UT-490. Joaquin Garcia.
- [18].- Estudio de la creación, desarrollo y método de la detection de grietas en ruedas ferroviarias. Belen Molina
- [19].- State of the art Wheel production. **Ulrich Koppers**
- [20].- Especificacion Tecnica para el suministro de ruedas monobloque de acero. **UIC 812-3**

[21].- Un choix de la SNCF: les roues monoblocs en acier non allie traitées en surface.

**Ravenent, M.P.**

[22].- Martensite formation around railway wheel flats. **Jergeús, J**

[23].- Study of rolling contact fatigue defects of freights car wheels. **Zakharov S M**

[24].- Mechanical behavior of materials for railways solid wheels. **Ghidini A**

[25].- rolling contact fatigue of railway wheels and raíls. **Ekberg A**

[26].- Fracture mechanics applied to the railways solid wheels manufacturing process

**A. GHIDINI**

[27].- Misura della Tenacità a Frattura in campo di transizione dell'acciaio R7T.

**ROBERTI, R**

[28].- *Criteri di meccanica della frattura applicati alla fabbricazione di ruote ferroviarie.*

**GHIDINI, A**

[29].- Handbook of Railway Vehicle Dynamics chapter 6 .-Track Issues.- **Simon**

**Iwnicki**

[30].- Characteristics of wave formation in rails, **Alias, J.,**

[31].- Railhead corrugation growth explained by dynamic interaction between track and bogie Wheelsets. **Igeland, A.**

[32].- Wheel – Rail Dynamics. **S., Linearized**

[33].- Dynamic train – track interaction: simulation of railhead corrugation growth under a moving bogie using mathematical models combined with full-scale measurements. **Igeland, A.**

[34].- Ingenieria Ferroviaria. **Julio Álvarez Rodríguez**

[35].-The principles of mechanical an electical railway traction. **H I Andrews**

[36].- Handbook of Railway Vehicle Dynamics chapter 4 .-Contact wheel-raíl.- **Simon**

**Iwnicki**

[37].- Apuntes Elasticidad y Resistencia de Materiales I. 3º Ingenieria Industrial Universidad Carlos III Madrid.

[38].- **RENFE**

[39].- Apuntes Ingenieria Termica de fluifos. 4º Ingenieria Industrial Universidad Carlos III

[40].- Apuntes Curso Autocad impartido por **M.S.L.**

**ANEXOS**

## CARACTERÍSTICAS CIVIA

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Tensión de alimentación:	3.000 Vcc
Ancho de vía:	1.668 mm.
Tipos de coches:	Extremos con cabina (A1)
	Intermedio con piso bajo (A2)
	Intermedio piso normal (A3)

DIMENSIONES COCHES	A1	A2/A3
Longitud entre enganches	22.400 mm.	17.750 mm.
Anchura exterior	2.940 mm.	2.940 mm.
Altura máxima sobre carril	4.260 mm.	4.260 mm.
Altura piso sobre carril	1.150 mm.	1.150 mm.
Distancia entre centros bogies	17.400 mm.	17.750 mm.

DIMENSIONES BOGIES	BM	BR
Empate	2.700 mm.	2.500 mm.
Diámetro ruedas nuevas	890 mm.	890 mm.

PRESTACIONES	
Velocidad máxima	120 km/h
Aceleración de arranque	1,1 m/s <sup>2</sup>
Aceleración entre 0 y 120 Km/h	0,59 m/s <sup>2</sup>
Deceleración en servicio	1,1 m/s <sup>2</sup>
Deceleración máxima	1,3 m/s <sup>2</sup>
Deceleración máxima de urgencia	1,3 m/s <sup>2</sup>

COMPOSICIONES				
Cantidad de coches	2	3	4	5
Longitud	44,8 m.	65,55 m.	80,3 m.	98,05 m.
Peso	80.000 Kg.	105.800 Kg.	131.500 Kg.	157.300 Kg.
Plazas sentadas	126	169	223	277
Plazas de pie	96	146	193	240
Total plazas	222	315	416	517
Potencia en régimen continuo	1.200 Kw.	1.400 Kw.	2.100 Kw.	2.200 Kw.

## DATOS VELOCIDAD CIVIA

### 1. OBJETO

El objeto de este documento es realizar el cálculo de las fuerzas tangenciales y pseudo-deslizamientos que aparecen en el contacto rueda-carril en unas condiciones definidas.

La dinámica de este vehículo ha sido calculada en el documento BB05202600003, en el que se hace una descripción del modelo así como una comprobación de los parámetros del mismo, entre ellos cargas estáticas y principales modos de vibración.

### 2. DOCUMENTOS RELACIONADOS

- EN14363 Railway applications – Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles – Testing of running behaviour and stationary tests
- ISO2631-1 Vibrations et chocs mécaniques-Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps
- UNE-ENV 12299 Aplicaciones Ferroviarias. Comodidad de Viaje para los viajeros. Medición y evaluación.
- QUESTION ORE 855 Moyens propres à assurer la circulation normale des wagons sur des voies reculant de gauches.
- BB06870010000/BB06870020000/BB06870030000 Plano bogies motores (1/2/3)
- BB06876010000/BB06876020000 Plano bogies remolque (1/2)
- BB05270211006 Rueda Acabada (Perfil AV)
- BB05277210000 Suspensión secundaria bogie extremo remolque
- BB05271710000 Suspensión secundaria bogie intermedia motor
- BB05271810000/ BB05271610000 Suspensión primaria bogie motor
- BB05277310000/BB05277110000 Suspensión primaria bogie remolque
- BB05202600002 Cálculo dinámico modulares Renfe
- BB05202600003 Cálculo dinámico Civia III

### 3. RESULTADOS

Se ha simulado el paso del vehículo por una curva de 250 metros y aceleración no compensada de 150 mm + 10%, calculándose los valores de las fuerzas tangenciales y los pseudo-deslizamientos en las direcciones longitudinales y transversales de la banda de rodadura, tanto para el eje 1 (bogie remolque) como para el eje 3 (bogie motor).

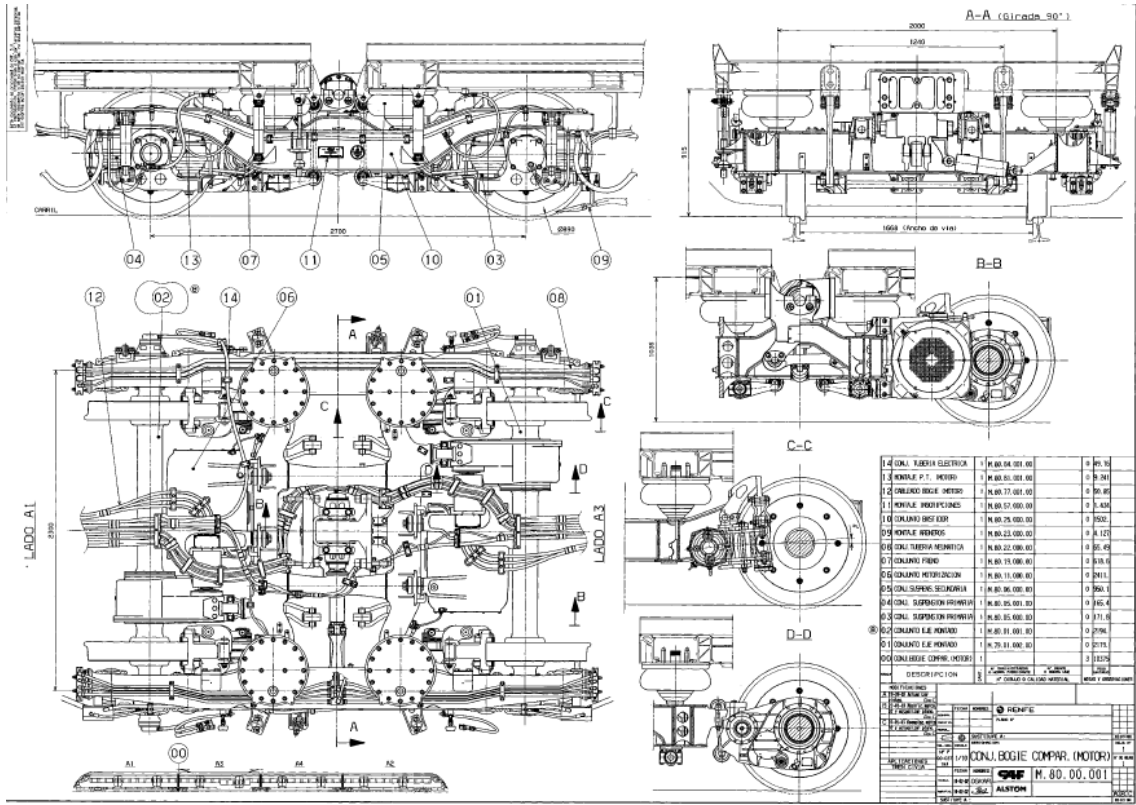


Los resultados se muestran en la siguiente tabla, no encontrándose ningún valor fuera del rango habitual de estos parámetros:

		pseudo-desl x	pseudo-desl y	F tan x (N)	F tan y (N)
EJE 1	Rueda exterior	-0.004	0.012	7000	-24000
	Rueda interior	0.006	0.010	-7500	-12000
EJE 3	Rueda exterior	-0.0035	0.010	8000	-24000
	Rueda interior	0.005	0.008	-8000	-14000



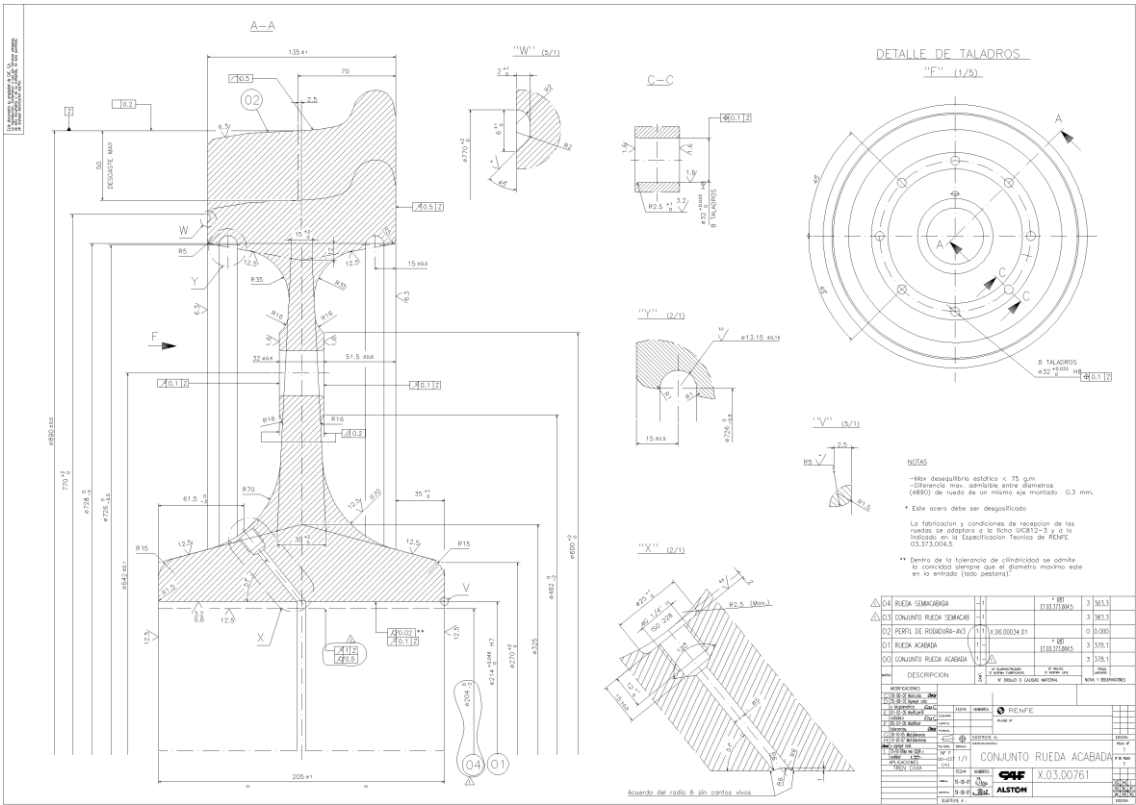
CONJUNTO BOGIE



## ANEXOS

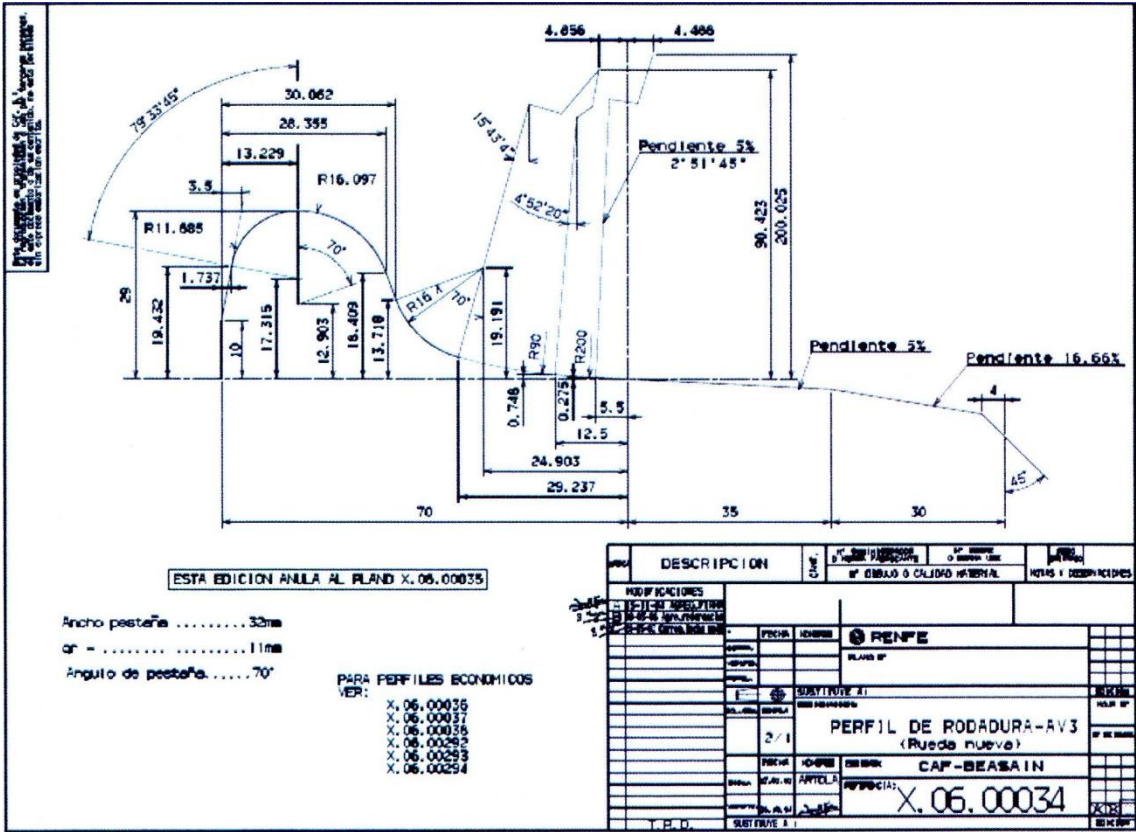


PLANOS RUEDA CIVIA



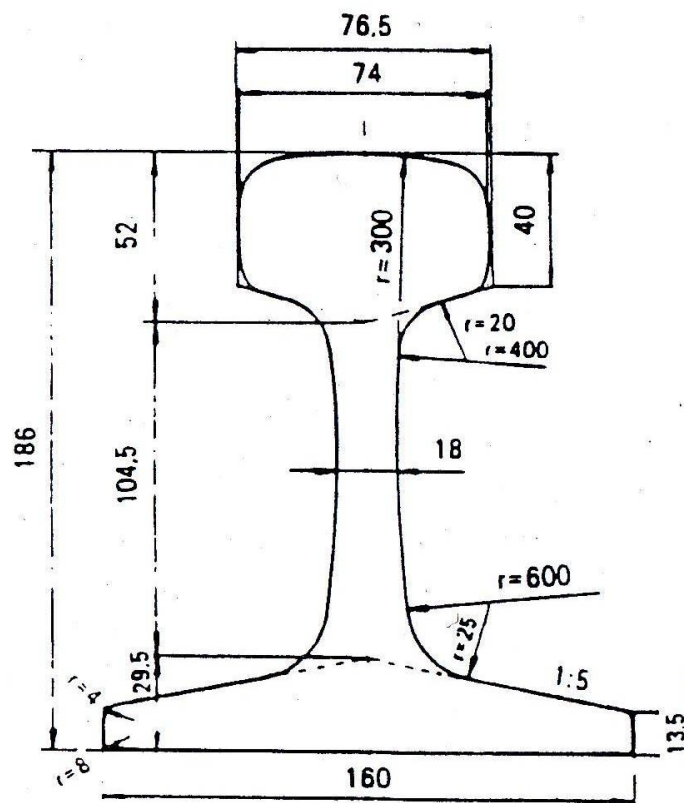


PERFIL RUEDA CIVIA



## PLANO CARRIL UIC

Sección: 9079 mm<sup>2</sup>  
 Peso: 71,27 Kg/m  
 Equilibrio térmico: 1,54  
 Momentos de inercia:  
   Vertical: 4151,66 cm<sup>4</sup>  
   Horizontal: 735,06 cm<sup>4</sup>  
 Módulos resistentes:  
   Vertical: 499,73 cm<sup>3</sup>  
   Horizontal: 91,90 cm<sup>3</sup>



CARRIL UIC-71

## DISEÑO TRAVIESAS

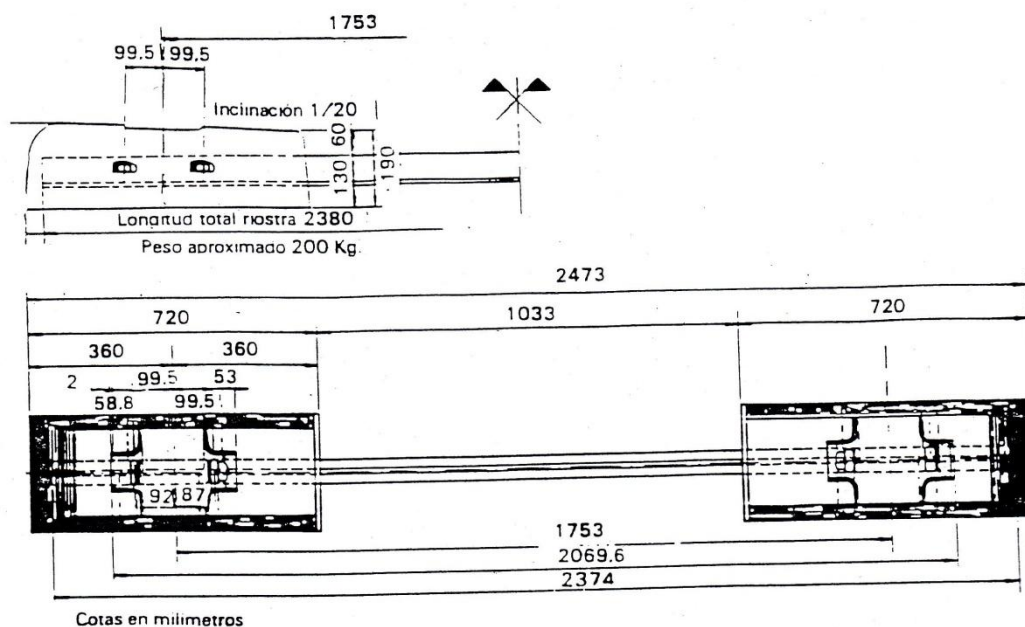


Figura Traviesa RS.

Material:	Hormigón armado.
Resistencia del hormigón:	475 Kg/cm <sup>2</sup> a 28 días.
Contenido en cemento:	325-375 Kg/m <sup>3</sup>
Armaduras por bloque:	10 barras lisas Ø 8 mm. 10 armaduras transversales Ø 5 mm. 1 cerco helicoidal Ø 5 mm.
Resistencia del acero:	42 Kg/mm <sup>2</sup> .
Límite elástico del acero:	26 Kg/mm <sup>2</sup> .
Riostra:	Perfil laminado en Y a partir de carriles recuperados.
Peso de acero:	24 Kg (incluida la riostra).
Peso total:	190 Kg (sin sujeción).
Longitud total:	247 cm.
Longitud por bloque:	72 cm.
Ancho máximo:	29 cm.



## DATOS NORMATIVA UNE 13262

Tabla 1 – Porcentajes máximos de los diferentes elementos especificados

Tipo de acero	Contenido máximo en % <sup>a</sup>										
	C	Si	Mn	P <sup>b</sup>	S <sup>bc</sup>	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr + Mo + Ni
ER6	0,48	0,40	0,75	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER7	0,52	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER8	0,56	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER9	0,60	0,40	0,80	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50

<sup>a</sup> Para aplicaciones especiales, se pueden acordar variaciones dentro del límite máximo de estos valores.

<sup>b</sup> Se puede acordar un contenido máximo de fósforo del 0,025% en el momento de la oferta y del pedido.

<sup>c</sup> Se puede acordar un contenido mínimo de azufre en el momento de la oferta y del pedido conforme al procedimiento de elaboración del acero con el fin de prevenir contra una fragilización por hidrógeno.

Tabla 2 – Características de la llanta y del velo de las ruedas

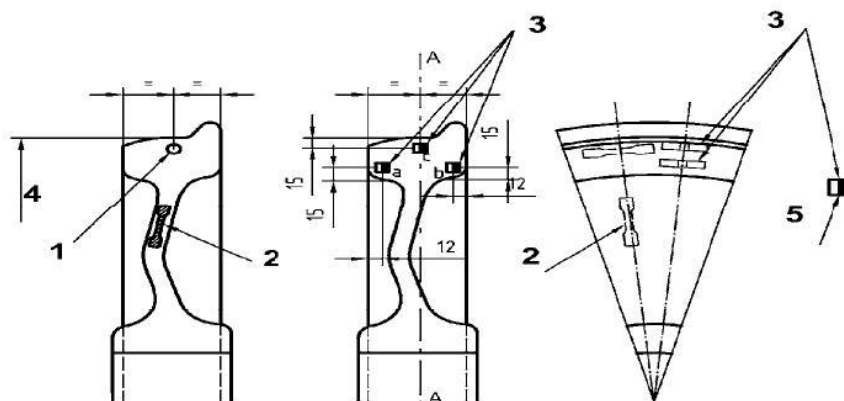
Tipo de acero	Llanta			Velo	
	$R_{eH}$ (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	$A_5\%$	Reducción de $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>b</sup>	$A_5\%$
ER6	≥ 500	780/900	≥ 15	≥ 100	≥ 16
ER7	≥ 520	820/940	≥ 14	≥ 110	≥ 16
ER8	≥ 540	860/980	≥ 13	≥ 120	≥ 16
ER9	≥ 580	900/1 050	≥ 12	≥ 130	≥ 14

<sup>a</sup> Si no hay límite aparente de elasticidad, se utilizará el límite convencional  $R_{p0,2}$ .

<sup>b</sup> Disminución de la resistencia a tracción en comparación a la resistencia a tracción de la llanta sobre la misma rueda.

### 3.2.1.2 Localización de las probetas

Las probetas se deben tomar en la llanta y en el velo de la rueda. Sus posiciones se indican en la figura 1.



#### Leyenda

- 1 Probeta de tracción
- 2 Probeta de tracción
- 3 Probeta de flexión por impacto
- 4 Diámetro nominal
- 5 Entalla

Tabla 4 – Valores a obtener para las características de resiliencia

Tipo de acero	KU (en julios) a + 20 °C		KV (en julios) a – 20 °C	
	Valores medios	Valores mínimos	Valores medios	Valores mínimos
ER6	≥ 17	≥ 12	≥ 12	≥ 8
ER7	≥ 17	≥ 12	≥ 10	≥ 7
ER8	≥ 17	≥ 12	≥ 10	≥ 5
ER9	≥ 13	≥ 9	≥ 8	≥ 5



Tabla F.1 – Tipo y número de controles a realizar

Características a verificar	Número de ruedas por lote a controlar			Referencia al apartado
	Cualificación (véase E.3.5)	Entrega (véase el capítulo F.4)		
Tamaño máximo del lote	≤ 100	≤ 250	> 250	
– Composición química	1	1	1	3.1
– Contenido en hidrógeno	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>	<sup>b</sup>
– Características a tracción				
en la llanta	1	1	2	3.2.1
en el velo	1	1	2	3.2.1
– Dureza en secciones de la llanta	1	1	2	3.2.2
– Dureza de la llanta (homogeneidad del lote)	100%	100%	100%	F.4.2
– Resistencia	1	1	2	3.2.3
– Tenacidad <sup>c</sup>	1	1	1	3.2.5
– Homogeneidad del tratamiento térmico	10% <sup>d</sup>	–	–	3.3
– Ausencia de inclusiones	1	1	2	3.4.1
– Integridad interna				
llanta	100%	100%	100%	3.4.2
cubo	100%	–	–	3.4.2
velo	20% <sup>e</sup>	–	–	3.4.2
– Orientaciones de las tensiones residuales	1	1	2	<sup>f</sup>
– Estado de la superficie	100%	100%	100%	3.6.1
– Integridad de la superficie	100%	100% <sup>g</sup>	100% <sup>g</sup>	3.6.2
– Geometría y medidas	100% <sup>h</sup>	100% <sup>h</sup>	100% <sup>h</sup>	3.7
– Desequilibrio estático	100%	100%	100%	3.8
– Ensayos complementarios	<sup>i</sup>	–	–	E.2.3

<sup>a</sup> Un análisis por colada. El muestreo debe hacer posible asegurar que el contenido medido sea representativo del máximo contenido en hidrógeno de la colada.

<sup>b</sup> El contenido en hidrógeno se determina conforme a los métodos descritos en el anexo A (normativo). Tiene que ser < 2 ppm para ruedas de categoría 1 y < 2,5 ppm para ruedas de categoría 2.

<sup>c</sup> Sólo para ruedas forjadas por ingotaje.

<sup>d</sup> Sólo para ruedas de categoría 1.

<sup>e</sup> El rechazo de una rueda en un lote requerirá la verificación del lote completo.

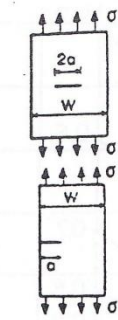
<sup>f</sup> Mediante acuerdo entre cliente y suministrador, una inspección visual según se define en el apartado F.4.4 puede reemplazar la inspección magnetoscópica.

<sup>g</sup> Diámetro de la banda de rodadura, diámetro del taladro, perfil de la llanta.

<sup>h</sup> A definir conforme a los resultados del ensayo de laboratorio (véase E.3.4).

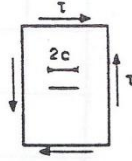
<sup>i</sup> Apartado E.3.5 para cualificación y apartado F.4.3 para entrega.

## TABLA FACTORES DE FORMA



$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left( \sec \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2}$$

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \left( \sec \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2}$$

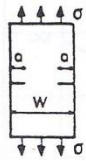


$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \left( \sec \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2}$$

$$\text{or } K_I = Y \sigma \sqrt{a}$$

$$\text{with } Y = 1.99 - 0.41 \frac{a}{W} + 18.7 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 38.48 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 53.85 \left( \frac{a}{W} \right)^4$$

$$(1.99 = 1.12 \sqrt{\pi})$$

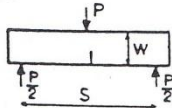


$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \left( \sec \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2}$$

$$\text{or } K_I = Y \sigma \sqrt{a}$$

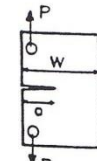
$$\text{with } Y = 1.99 + 0.76 \frac{a}{W} - 8.48 \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 27.36 \left( \frac{a}{W} \right)^3$$

$$(1.99 = 1.12 \sqrt{\pi})$$



Thickness B

$$K_I = \frac{PS}{BW^{3/2}} \left[ 2.9 \left( \frac{a}{W} \right)^{1/2} - 4.6 \left( \frac{a}{W} \right)^{3/2} + 21.8 \left( \frac{a}{W} \right)^{5/2} - 37.6 \left( \frac{a}{W} \right)^{7/2} + 38.7 \left( \frac{a}{W} \right)^{9/2} \right]$$



Thickness B

$$K_I = \frac{P}{BW^{1/2}} \left[ 29.6 \left( \frac{a}{W} \right)^{1/2} - 185.5 \left( \frac{a}{W} \right)^{3/2} + 655.7 \left( \frac{a}{W} \right)^{5/2} - 1017 \left( \frac{a}{W} \right)^{7/2} + 63.9 \left( \frac{a}{W} \right)^{9/2} \right]$$



p per unit thickness

$$K_I = p \sqrt{\pi a}$$



$$K_{I_{\max}} = 1.12 \frac{\sigma}{\Phi} \sqrt{\pi a}$$

$$K_{I_{\min}} = 1.12 \frac{\sigma}{\Phi} \sqrt{\pi a^2 / c}$$

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \left[ 1 - \frac{c^2 - a^2}{c^2} \sin^2 \varphi \right] d\varphi$$

$$\Phi \approx \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{8} \frac{a^2}{c^2}$$